

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Měření přesnosti obráběcího stroje ve firmě
VOP CZ, s.p. pomocí Ballbar systému

Measurement of the Machine Tool Precision
in VOP CZ, s.p. by Using Ballbar System

Student: Bc. Patrik Toman
Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Patrik Toman**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 20 Strojírenská technologie

Téma: Měření přesnosti obráběcího stroje ve firmě VOP CZ, s.p. pomocí
Ballbar systému
Measurement of the Machine Tool Precision in VOP CZ, s.p. by Using
Ballbar System

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky měření přesnosti obráběcích strojů.
3. Zpracování dat.
4. Vyhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978–80–248–1641–8.
- [2] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978–80–8070–711–8.
- [3] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0–19–514206–3.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



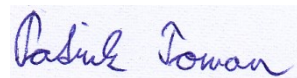

doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16. 5. 2016



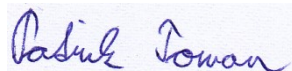
.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

16. 5. 2016



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Patrik Toman

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Dvořákova 6, 741 01 Nový Jičín

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

TOMAN, P. *Měření přesnosti obráběcího stroje ve firmě VOP CZ, s.p. pomocí Ballbar systému: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 57 s. Vedoucí práce: Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá měřením přesnosti CNC obráběcího stroje pomocí Ballbar systému. V práci je přiblížena problematika týkající se daného měření přesnosti obráběcích strojů a jsou v ní uvedeny příslušné technické normy zabývající se zásadami a zkouškami těchto strojů. V práci jsou dále uvedeny různé metody kontroly a měření CNC obráběcích strojů a je v ní blíže popsán měřicí systém Ballbar. V praktické části jsou popsány měřený stroj, použité měřicí zařízení, postup měření a je uvedena zvolená metodika měření. V této práci jsou zmíněny a porovnány výsledné hodnoty a grafy jednotlivých měření. Je provedeno vyhodnocení výsledků a sepsány závěry a doporučení získané při této práci.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

TOMAN, P. *Measurement of the Machine Tool Precision in VOP CZ, s.p. by Using Ballbar System: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2016, 57 p. Thesis head: Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Master thesis is dealing with the measurement of the precision of the CNC machine tool using Ballbar system. In the work are explained issues related to the measurement of the precision of machine tools and are listed the ones of the relevant technical standards which is dealing with the principles and tests of these machines. The thesis also lists various methods of control and measurement of CNC machine tools and in more detail is described the measuring system Ballbar in this. In the practical part are described the measured machine, the using measuring equipment, measurement procedure and is listed the selected methodology of measurement. In this work are discussed and compared the resulting values and graphs of individual measurements. Is done an evaluation of the results and are drawn conclusions and recommendations obtained in this work.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
1 Úvod	9
2 Teoretický rozbor problematiky měření přesnosti obráběcích strojů	10
2.1 Přesnost obrábění	10
2.2 Přesnost dnešních CNC obráběcích strojů	10
2.3 Činitelé ovlivňující přesnost obrábění	11
2.4 Podmínky a zásady zkoušek CNC obráběcích strojů	11
2.4.1 Termíny a definice	12
2.4.2 Podmínky zkoušek	14
2.5 Metody kontroly a měření CNC obráběcích strojů	15
2.5.1 Preventivní prohlídka stroje	15
2.5.2 Kontrola vřeteníků	16
2.5.3 Kontrola a kalibrace odměřovacích systémů stroje	16
2.5.4 Kontrola kruhové interpolace	17
2.6 Ballbar systém	18
2.6.1 Vznik Ballbaru	18
2.6.2 Popis a funkce	18
3 Zpracování dat.....	20
3.1 Popis měření a měřicího přístroje	20
3.2 Popis měřeného stroje	20
3.3 Postup měření	23
3.3.1 Úkony před měřením	23
3.3.2 Úkony během měření	23
3.3.3 Úkony po skončení měření	23
3.4 Metodika měření	23
3.5 Průběh měření	24
3.6 Nejistoty měření	25
3.6.1 Příklad výpočtu výběrového průměru a nejistoty měření	26

4 Vyhodnocení měření	28
4.1 Měření v rovině XY 360° H1; H2 a H3.....	29
4.2 Měření v rovině XY 360° S1; S2 a S3	31
4.3 Měření v rovině XY 360° D1; D2 a D3.....	33
4.4 Měření v rovině YZ 220° H1; H2 a H3.....	35
4.5 Měření v rovině YZ 220° S1; S2 a S3	37
4.6 Měření v rovině YZ 220° D1; D2 a D3.....	38
4.7 Měření v rovině ZX 220° H1; H2 a H3.....	40
4.8 Měření v rovině ZX 220° S1; S2 a S3	42
4.9 Měření v rovině ZX 220° D1; D2 a D3.....	43
4.10 Výsledné vyhodnocení všech měření.....	45
5 Závěr a doporučení	46
6 Seznam použité literatury a zdrojů.....	48
7 Seznam příloh.....	50

Seznam použitých značek a symbolů

VOP CZ, s.p.	Vojenský opravárenský podnik Česká republika, státní podnik
CNC	Cumputerized Numerical Control (počítačové číslicové řízení)
PC.....	Personal Computer (osobní počítač)
NC.....	Numerical Control (číslicové řízení)
ČSN	Česká technická norma
ISO.....	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
USA	United States of America (Spojené státy americké)
Plc.....	Public Limited Company (název britského typu obchodní společnosti)
ASME.....	American Society of Mechanical Engineers (Americká společnost strojních inženýrů)
CD-ROM	Compact Disc Read-Only Memory (optické záznamové médium)

1 Úvod

V dnešní době je ve strojírenském průmyslu prováděna veliká škála výrobních procesů. Obrábění patří mezi jedny z nejčastěji prováděných prací. Ve velké míře se využívá obrábění na CNC obráběcích strojích, které si díky plnění vysokých požadavků při výrobě zajistily široké uplatnění. Mohou svým provedením zajišťovat vysokou produktivitu a přesnost i složitě obráběných součástí různých velikostí. Mnoho strojů je často zapojeno do nepřetržitého provozu. Při vysokém vytížení těchto strojů dochází samozřejmě k opotřebení některých jejich částí. Abychom zajistili bezproblémový chod a zachovali požadované vlastnosti stroje, je nutné klást velký důraz na jeho údržbu. Při údržbě je důležité dodržovat její pravidelnost a provedení úkonů předepsaných výrobcem stroje. Při zanedbání údržby by mohly značně narůstat náklady vzniklé s provozováním takového stroje a to jak na něm samotném, tak i na produkci s ním spojené. Při údržbě strojů se velmi často využívají různé diagnostické systémy a zařízení pro zjišťování závad. Díky těmto systémům lze přesně určit stav jednotlivých celků daného stroje a stanovit další postup při provádění údržbových prací. Těchto systémů existuje celá řada různých provedení, které pracují na různých principech zjišťování závad stroje.

Tato práce se blíže zabývá diagnostickým systémem Ballbar, který je v praxi často používaný a poskytuje řadu možností diagnostiky CNC obráběcího stroje. Cílem je pomocí tohoto systému ověřit přesnost vybraného CNC obráběcího stroje ve firmě VOP CZ, s.p.. Podle výsledků měření a jejich následného vyhodnocení je úkolem práce stanovit stav stroje a určit, zda bude potřeba vykonání některých úkonů souvisejících s údržbou tohoto stroje.

2 Teoretický rozbor problematiky měření přesnosti obráběcích strojů

Tato problematika je velice rozsáhlá, proto je nutno přiblížit alespoň několik důležitých aspektů.

2.1 Přesnost obrábění

Strojní součásti jsou vyráběny podle výkresové dokumentace, která uvádí stěžejní údaje pro jejich zhotovení. Pro dané součásti v ní bývají stanoveny požadované rozměry s příslušnými tolerancemi, geometrické tolerance, drsnosti povrchu a jiné důležité údaje. Při výrobě, tedy i obrábění, je žádoucí přiblížení se co nejvíce k těmto údajům. Ve skutečnosti však vznikají odchylky od předepsaných hodnot. Přesnost obrábění můžeme také definovat jako velikost shody skutečné hodnoty určitého údaje obrobené součásti s hodnotou příslušného údaje uvedeného na výkresové dokumentaci této součásti. [1]

2.2 Přesnost dnešních CNC obráběcích strojů

Výrobci obráběcích strojů se snaží stále zvyšovat jejich přesnost, a proto jsou dnes CNC obráběcí stroje schopny běžně vyrábět s odchylkami vyjádřenými v tisícinách milimetrů. Nejpřesnější CNC obráběcí stroje však již dokážou pracovat s hodnotami řádů nanometrů, což znamená hodnoty až 0,000001 mm. Strojů, které dokážou s velikostí této veličiny pracovat, není prozatím mnoho. Firma Fanuc však vyvinula CNC obráběcí stroj s názvem ROBONANO α -0iB, který je zobrazen na obrázku (obr. 1) a lze ho zařadit mezi jeden z nejpřesnějších CNC strojů. Na lineárních osách (X, Y, Z) umožňuje dosahovat rozlišení 1 nanometr a na rotačních osách (B, C) až 0,000001°. Díky tomu má stroj široké uplatnění v různých oblastech. Přesnost každého CNC obráběcího stroje ovlivňuje hlavně jeho konstrukce. Stroj ROBONANO α -0iB má řešeny všechny pohyblivé části statickou vzdušnou nosnou konstrukcí, díky čemuž je eliminováno v řídicím systému veškeré tření, které by mohlo způsobovat nepřesnosti. Potrubí má navíc takovou konstrukci, aby bylo veškeré proudění v něm laminární. Jelikož nevytváří žádné vibrace ani vzdušné turbulence, dovoluje mu dosáhnout maximální přesnosti. Stroj zajišťuje přesné CNC frézování současně až v pěti osách. [5]



Obr. 1 CNC stroj ROBONANO α-0iB [5]

2.3 Činitelé ovlivňující přesnost obrábění

Výslednou přesnost obrobených součástí na obráběcích strojích ovlivňuje velká řada činitelů. Základem každého obrábění je soustava stroje, nástroje a obrobku (někdy navíc i přípravku), která musí splňovat určitá kritéria. Jelikož se tato práce zabývá přesností obráběcích strojů, zaměří se blíže pouze na jejich problematiku.

Každý obráběcí stroj je vyroben tak, aby jeho součásti splňovaly určitou přesnost, která výsledně ovlivňuje přesnost obráběných součástí. Při provozu obráběcích strojů dochází k jejich opotřebení, respektive k opotřebení některých jejich částí, které je přípustné jen do určitých mezí. V případě, že odchylky při obrábění začnou přesahovat předepsané meze, musí se daný stroj seřídít nebo opravit. Kontrola a měření přesnosti obráběcích strojů jsou stanoveny v technických normách. [1]

2.4 Podmínky a zásady zkoušek CNC obráběcích strojů

Podmínky a zásady zkoušek obráběcích strojů a center určují technické normy řady ČSN ISO 10791 a ČSN ISO 230. Cílem norem řady ČSN ISO 10791 je poskytnout široké a úplné informace o zkouškách, které se mohou provádět pro porovnání, při přejímce, údržbě nebo pro jakýkoliv jiný účel. [3]

Tato práce se zabývá kontrolou CNC obráběcího stroje měřením kruhové interpolace, kterou blíže specifikuje norma ČSN ISO 10791-8 Podmínky zkoušek pro obráběcí centra – Část 8: Vyhodnocení vlastností interpolace ve třech souřadných rovinách a dále norma ČSN ISO 230-4 Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 4: Zkoušky kruhové interpolace

u číslicově řízených obráběcích strojů. Pro aplikaci normy ČSN ISO 10791-8 je nutno přímo učinit odkaz na ČSN ISO 230-4, kde jsou blíže specifikovány a popsány podmínky, postupy a vyhodnocení zkoušek kruhové interpolace. Z plného znění normy ČSN ISO 230-4 jsou vybrány následující důležité části: [3], [4]

2.4.1 Termíny a definice

„ Pro účely tohoto normativního dokumentu platí následující termíny a definice.

Jmenovitá dráha

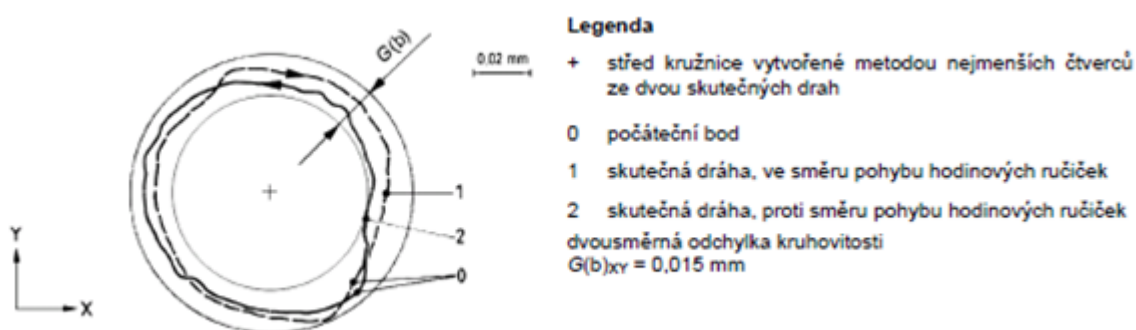
Číslicově řízená a programovaná kruhová dráha, definovaná svým průměrem (nebo poloměrem), polohou svého středu a jeho orientací v pracovním prostoru obráběcího stroje, která může být tvořena úplnou kružnicí, nebo jen její částí alespoň v rozsahu 90°.

Skutečná dráha

Dráha vytvářená strojem při zadaném programu pohybu po jmenovité dráze.

Dvousměrná odchylka kruhovitosti $G(b)$

Minimální radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic (kružnice minimální zóny) ohraničující dvě skutečné dráhy, kde jedna dráha je tvořena pohybem ve směru hodinových ručiček a druhá dráha pohybem proti směru hodinových ručiček (viz obr. 2).

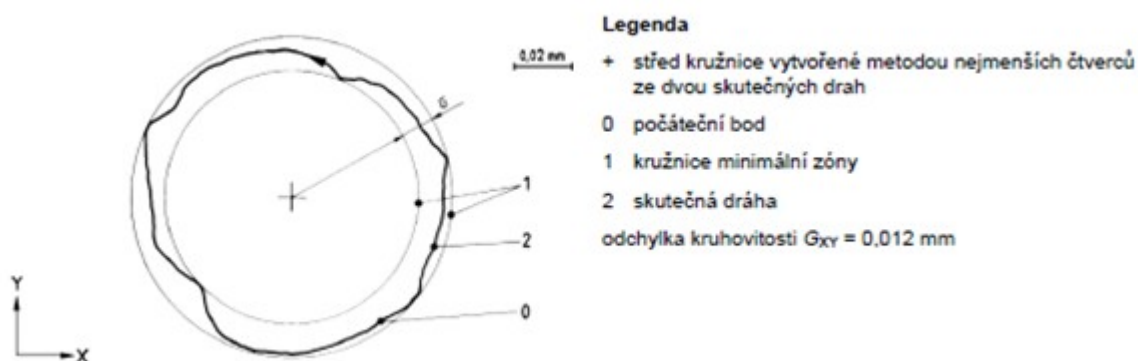


Obr. 2 Vyhodnocení dvousměrné odchylky kruhovitosti $G(b)$ [4]

Odchylka kruhovitosti G

Minimální radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic (kružnice minimální zóny) ohraničující skutečnou dráhu ve směru nebo proti směru pohybu hodinových ručiček

vrstevnicové dráhy a která může být vyhodnocena jako maximální radiální rozsah okolo kružnice vytvořené metodou nejmenších čtverců. (viz. obr. 3).



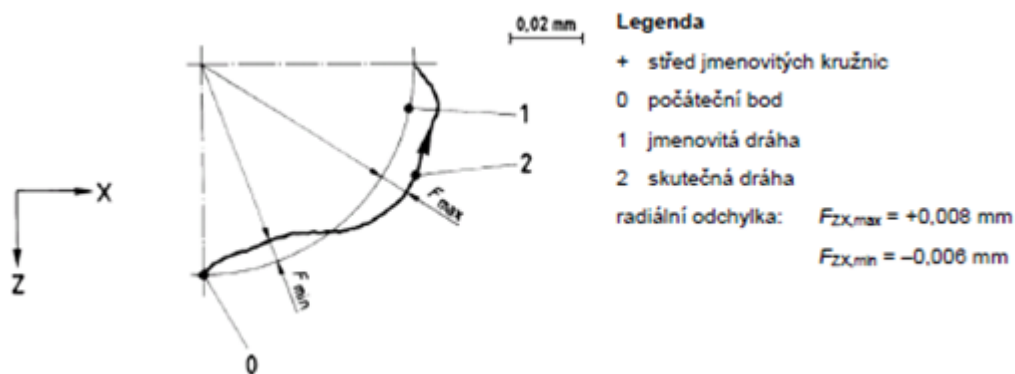
Obr. 3 Vyhodnocení odchylky kruhovitosti G [4]

Radiální odchylka F

Odchylka mezi skutečnou dráhou a jmenovitou dráhou, přičemž střed dráhy se zjistí:

- buď ze středění měřících přístrojů na obráběcím stroji,
- nebo ze středicí analýzy nejmenších čtverců, pouze pro celou kružnici.

Kladné odchylky jsou měřeny směrem od středu kružnice a záporné směrem ke středu kružnice (viz. obr. 4).



Obr. 4 Vyhodnocení radiální odchylky F [4]

Průměrná dvousměrná radiální odchylka D

Odchylka mezi poloměrem jmenovité dráhy a poloměrem kružnice vytvořené metodou nejmenších čtverců dvou úplných kružnic skutečných drah, kde jedna dráha je provedena pohybem ve směru hodinových ručiček a druhá pohybem proti směru hodinových ručiček.

Identifikace os

Označení os, ve kterých je vykonáván pohyb pro vytvoření skutečné dráhy.

Smysl pohybu po dráze

Ve směru nebo proti směru pohybu hodinových ručiček pořadí indexů indikuje označení směru dráhy.“ [4]

2.4.2 Podmínky zkoušek

„Zkušební environment

Pokud je možné řídit teplotu environmentu, musí být nastavena na 20°C. Jinak musí být výstup měřicího přístroje a jmenovité odečítání stroje nastaveny tak, aby dávaly výsledky opravené na 20°C (jen pro měření radiální odchylky). Stroj, a pokud je to nutné, i měřicí přístroj musí být v daném zkušebním environmentu dostatečně dlouho, aby bylo před zkoušením docíleno ustálení jejich teploty. Stroj i měřicí přístroj musí být chráněny před průvanem a vyzařováním vnějších zdrojů, jako je například sluneční záření, tepelné zdroje atd.

Zkoušený stroj

Stroj musí být kompletně smontován a plně funkční. Všechny nezbytné vyrovnání stroje a funkční zkoušky musí být dokončeny před započítáním zkoušek. Všechny zkoušky kruhové interpolace musí být provedeny při nezatíženém stroji, tj. bez obrobku.

Ohřátí stroje

Zkouškám musí předcházet vhodný ohřívací postup stroje specifikovaný výrobcem stroje anebo dohodnutý mezi dodavatelem (výrobcem) a uživatelem.

Pokud nejsou specifikovány žádné podmínky, musí být pohyby předcházející zkoušce omezeny pouze na pohyby nutné pro seřízení měřicího přístroje.

Zkouška nejistoty

Hlavními příčinami ke zkoušce nejistoty dvousměrné odchyly kruhovitosti $G(b)$ a odchyly kruhovitosti G jsou:

- *nejistota měření zkušebního zařízení,*
- *opakovatelnost obráběcího stroje kontrolovaná například opakováním zkoušky kruhové interpolace,*
- *teplotní drift obráběcího stroje anebo zkušebního zařízení kontrolované například zkouškou driftu podle ISO/TR 16015.*

Hlavními příčinami ke zkoušce nejistoty průměrné dvousměrné radiální odchyly D a radiální odchyly F jsou:

- *příčiny odchylek $G(b)$ a G (viz. předcházející),*
- *nejistota měření teploty obráběcího stroje a zkušebního zařízení způsobená nejistotou teplotního snímače (snímačů) a nejistotou vlivem umístění teplotního snímače (snímačů),*
- *nejistota součinitelů teplotní roztažnosti obráběcího stroje a zkušebního zařízení (použitá pro kompenzaci na 20°C).“ [4]*

2.5 Metody kontroly a měření CNC obráběcích strojů

Metod pro kontrolu a měření CNC obráběcích strojů je celá řada, liší se podle toho, na kterou konkrétní část stroje je potřeba se zaměřit. Mohou být určeny tyto jednotlivé metody kontroly strojů:

- preventivní prohlídka,
- kontrola vřeteníků,
- kontrola odměřovacích systémů,
- test kruhové interpolace.

2.5.1 Preventivní prohlídka stroje

Preventivní prohlídka je součástí pravidelné údržby každého stroje. Zaměřuje se na kontrolu jednotlivých funkčních celků stroje. Kontroluje se vedení a pohybové šrouby lineárních os, mazací systém, hydraulický systém apod. Čistí se prostory pod kryty stroje a kontrolují se při ní veškeré motory stroje (osové i motory periferních zařízení). U elektrické výzbroje rozvaděče je provedena kontrola dotažení svorek. Jsou vyčištěny veškeré ventilátory a kontrolují se a čistí také všechny koncové spínače a snímače polohy

(lineárních os i okruhu nouzového zastavení). Provádí se výměna, resp. vyčištění filtrů jednotlivých médií (olej, řezná emulze). V rámci této prohlídky bývá prováděna pro případ ztráty dat některého ze strojů záloha strojních dat řídicího systému. Při preventivní prohlídce mohou být také odstraněny zjištěné drobné poruchy. [6]

2.5.2 Kontrola vřeteníků

Vřeteník stroje se kontroluje pomocí vibrační diagnostiky. Touto metodou můžeme zjistit skutečný stav ložisek uložení vřetena, stav mazání vřetena a celkovou velikost vibrací. Vibrační diagnostikou lze proměřit pohon vřetena. Měřením je možné zachytit i počáteční poškození ložisek a včasným zásahem lze v tomto případě předejít rozsáhlejší poruše stroje. U frézovacích center a horizontálních vyvrtávaček se navíc pomocí speciálního přístroje provádí kontrola upínání nástrojů, kdy se měří upínací síly a výsledek je porovnán s hodnotou udávanou výrobcem stroje. Kuželovým kalibrem se na obtisk barvy kontroluje stav kuželové dutiny vřetena, čímž se dá předpovědět případné poškození kuželové dutiny například možnou bodovou korozí. [6]

2.5.3 Kontrola a kalibrace odměřovacích systémů stroje

Pro kontrolu a kalibrování odměřovacích systémů stroje se využívá laserový interferometr v kombinaci s kompenzační jednotkou. Interferometry jsou optické přístroje využívající interferenci světla obecně pro zjišťování rovinnosti ploch, přímočarosti vedení, vzdálenosti atd. Nejznámější představitel je Michelsonův dvousvazkový interferometr. Pracuje na principu rozdělení světelné vlny, vycházející ze světelného zdroje, na referenční a měřící vlnu. Pomocí zrcadel jsou tyto vlny odraženy zpět na dělící zrcadlo, kde se opět spojí v jednu výslednou vlnu. Následná interference vzniká na výstupu interferometru podle rozdílu délky obou ramen. Jako světelný zdroj je využívána laserová jednotka (obr. 5), která vytváří stabilní svazek laserového záření odpovídající příslušným normám. [7]



Obr. 5 Laserová jednotka Renishaw XL-80 [7]

Kompenzátor, který je zobrazen na obrázku (obr. 6), slouží pro zajištění přesnosti lineárního měření. Jelikož změna okolních podmínek jako je teplota, tlak a relativní vlhkost vzduchu může ovlivnit vlnovou délku laserového světla a naměřené hodnoty, jsou součástí i příslušné snímače. Pomocí údajů z těchto snímačů systém upravuje vlnovou délku laseru tak, aby do výpočtů stále vstupovala její správná hodnota. Díky tomu prakticky eliminuje jakékoliv chyby měření vyplývající ze změn podmínek prostředí. [7]



Obr. 6 Kompenzátor Renishaw XC-80 a snímače [7]

Princip samotné kontroly spočívá v proměření přesnosti a opakovatelnosti najetí polohy jednotlivých lineárních os. Používají se k tomu mimo jiné různé soupravy měřících optik. Po změření následuje úprava nebo u nově kalibrovaných strojů vytvoření korekčních map v řídicím systému - nelineární kompenzace naměřených chyb. Na závěr kalibrace se zkompenzovaný stroj opět kontrolně proměří. Tato kalibrace odměřovacích systémů se doporučuje provádět po každé úpravě geometrie stroje, například při novém ustavení základů, nebo jsou-li měněny kuličkové šrouby nebo je na stroji měněno odměřování. [6]

2.5.4 Kontrola kruhové interpolace

Pro základní diagnostickou metodu kontroly CNC obráběcích strojů se využívá měření geometrické přesnosti a dynamických vlastností pohonů systémem Ballbar. Test kruhové interpolace je prováděn u soustruhů v jedné rovině nebo u obráběcích center ve více rovinách. Měřicím přístrojem jsou snímány odchylky naměřených dat od ideálního kruhu. Na základě deformace výsledného grafu lze vyhodnotit vliv aktuálních chyb stroje na jeho přesnost. Při této kontrole lze přesně určit, jestli jsou detekované chyby způsobené mechanikou stroje, nesprávně nastavenou dynamikou pohonů nebo chybami v nastavení odměřovacích systémů. Následně je možno vyhodnotit stupeň závažnosti detekovaných chyb na přesnost stroje a navrhnout technické řešení odstranění závady. Hodnoty naměřených axiálních vůlí se mohou dočasně eliminovat zadáním kompenzace v řídicím systému. [6]

2.6 Ballbar systém

Tato práce se zabývá měřením tímto systémem, z toho důvodu je třeba uvést bližší informace týkající se daného zařízení a jeho popisu.

2.6.1 Vznik Ballbaru

Vznik zařízení Ballbar se připisuje panu Jamesovi B. Bryanovi, který se tímto zabýval ve své práci v Lawrence Livermore National Laboratory v USA. V roce 1984 získal americký patent na toto teleskopické magnetické testovací zařízení s kuličkou a tyčinkou. Výrobou tohoto zařízení se od roku 1991 zabývá firma Renishaw plc, která postupem času uváděla na trh několik jeho modelů. Dnes jsou využívány nejmodernější technologie jako je například bezdrátová technologie přenosu dat Bluetooth. [8]

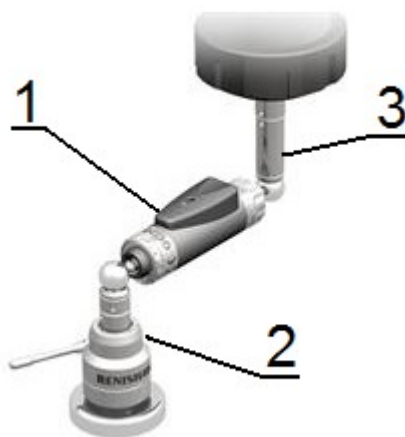
2.6.2 Popis a funkce

Celý měřicí systém se skládá z dvou základních skupin, kterými jsou hardware a software. Hardware obsahuje tyto základní části:

- lineární snímač s kuličkou na obou koncích,
- magnetický upínač na stůl stroje,
- magnetický upínač do vřetena stroje,
- kalibrátor.

Může dále obsahovat prodlužovací nástavce a jiné příslušenství pro různé typy měření.

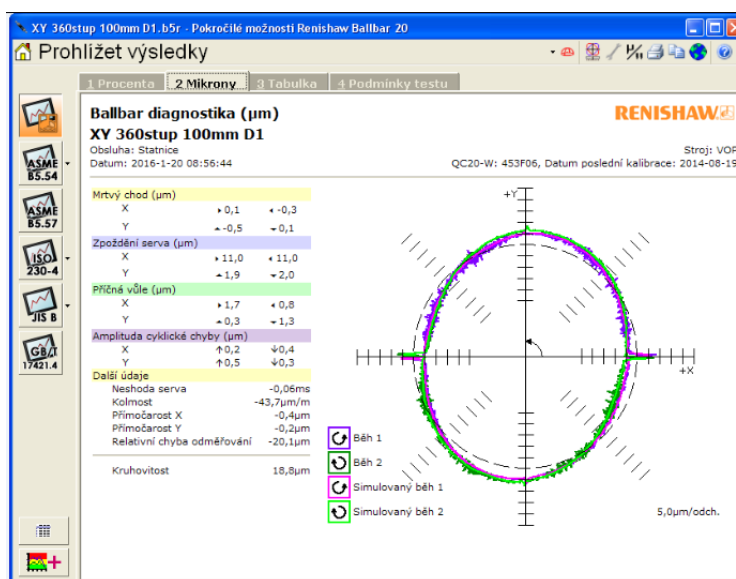
Součástí každé měřicí sady je kalibrátor. Kalibrátor je vyroben z materiálu s téměř nulovým součinitelem teplotní roztažností a používá se pro kalibraci délky snímače s kuličkami. Po ustavení jednotlivých částí měřicího systému zobrazených na obrázku (obr. 7) jsou při spuštění testu kuličky snímače vedeny v přesných magnetických miskách. Při vykonávaném pohybu je snímač schopen měřit i nepatrné změny poloměru naprogramované kruhové dráhy vykonávané okolo magnetického držáku připevněného na stole stroje. Během toho jsou snímaná data přenášena do počítače, kde software zpracovává celkové naměřené hodnoty přesnosti. Vše je uváděno v souladu s příslušnými normami. Výsledná data jsou zaznamenána v protokolu ve formě grafů i číselných hodnot. Použití tohoto systému je blíže popsáno v kapitole 2.5.4. [8]



Obr. 7 Systém Ballbar Renishaw QC20-W [8]

1 – lineární snímač s kuličkou na obou koncích; 2 – magnetický upínač na stůl stroje; 3 – magnetický upínač do vřetena stroje

Software umožňuje volumetrickou diagnostiku, což znamená výběr a zobrazení až tří souborů testu z kolmých rovin na jedné stránce. Obsahuje diagnostiku podle norem ISO 230-4: 2005 a ASME B5.54-2008 a několika dalších. Ukázka prohlížení výsledků v softwaru Ballbar Renishaw je zobrazena na obrázku (obr. 8). Software má také funkci pro automatické vytváření dílčích NC programů pro testování danou metodou Ballbar. Mimo jiné také umožňuje ukládání jednotlivých měření různých strojů a vedení jejich historie, což poskytuje kontrolu nad měnící se přesností stroje. Užitečným nástrojem je možnost grafického zobrazení trendu přesnosti libovolného zdroje, kde se dá přehledně zjistit, kolik parametrů stroje se změnilo za určitou dobu. Snadno lze díky tomuto nástroji například plánovat požadavky na údržbu. [9]



Obr. 8 Ukázka prohlížení výsledků v softwaru Renishaw Ballbar 20 [14]

3 Zpracování dat

Před měřením je nutno popsat měřicí zařízení a daný stroj, které jsou použity při kontrolním měření a uvést určité postupy a pravidla.

3.1 Popis měření a měřicího přístroje

Při měření přesnosti obráběcího stroje v této práci je prováděna metoda kontroly kruhové interpolace systémem Ballbar QC20-W od firmy Renishaw. Kompletní měřicí systém i s příslušenstvím je zobrazen na obrázku (obr. 9). Technické parametry tohoto systému jsou uvedeny v tabulce (tab. 1).

Tab. 1 Technické parametry systému Ballbar [10]

Typ systému	QC20-W	Jednotky
Rozlišení snímače	0,1	μm
Přesnost snímače	± 0,5	μm
Přesnost měření systému	± 1,25	μm
Rozsah měření snímačem	± 1,0	mm
Zdvih snímače	1,75 až -1,25	mm
Rychlost snímání max.	1000	Hz
Dosah přenosu dat ze snímače	10	m
Rozměry kufříku (D x Š x V)	395 x 300 x 105	mm



Obr. 9 Systém Ballbar Renishaw QC20-W s příslušenstvím

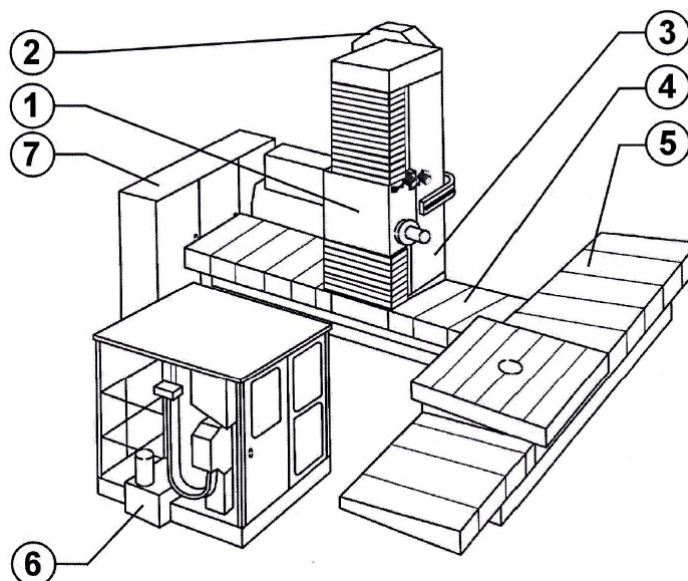
3.2 Popis měřeného stroje

Měření je prováděno na jednom CNC obráběcím stroji WHQ 13 CNC od výrobce TOS Varnsdorf a.s.. Jedná se o horizontální vyvrtávací stroj v provedení s příčným

stolem. Základní části stroje jsou zobrazeny na obrázku (obr. 10). Stroj byl vyroben v roce 2011. Technické parametry stroje jsou uvedeny v tabulce (tab. 2).

Tab. 2 Hlavní technické údaje stroje [2]

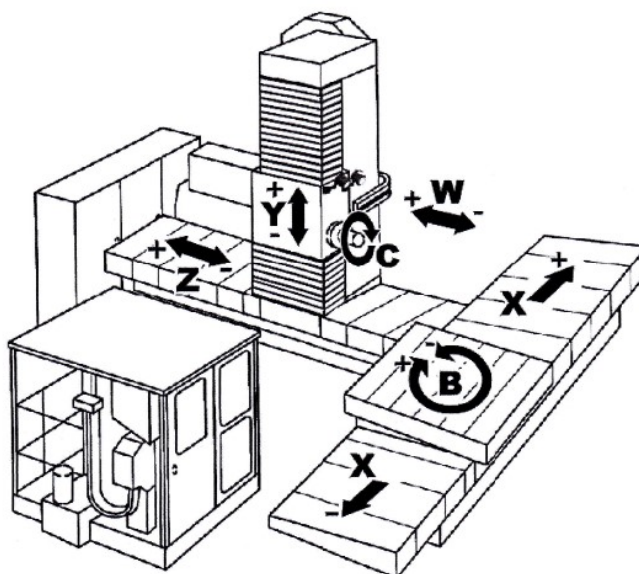
Výrobní číslo stroje	3558	Jednotky
Průměr pracovního vřetena	130	mm
Rozsah otáček vřetena	10 až 3000	1/min
Výkon hlavního motoru max.	37	kW
při otáčkách	1500	1/min
Jmenovité otáčky vřetena	141	1/min
Krouticí moment vřetena max.	2500	Nm
Příčné přestavení stolu X	5000	mm
Svislé přestavení vřeteníku Y	2500	mm
Podélné přestavení stojanu Z	2200	mm
Vysunutí pracovního vřetena W	800	mm
Rozměry stolu	1800x2500	mm
Zatížení stolu max.	12000	kg
Upínací síla nástroje	25	kN
Posuvové síly X, Y a W max.	30	kN
Posuvové síly Z max.	40	kN
Hlučnost stroje v prac. místě max.	80	dB
Hmotnost stroje	38650	kg
Upínání nástroje	hydromechanické	
Řídicí systém	Heidenhain iTNC 530	
Odměřování	Heidenhain	
Pohony	Siemens	



Obr. 10 Horizontální vyvrtávací stroj WHQ 13 CNC [2]

1 – vřeteník a výložník; 2 – zásobník a manipulátor nástrojů; 3 – stojan; 4 – podélné lože a saně stojanu; 5 – příčné lože, saně stolu a stůl; 6 – plošina obsluhy; 7 – elektroskříň

Při jakékoliv práci na CNC obráběcím stroji je nutno znát jeho základní pohyby. Mezi tyto pohyby patří jednotlivé posuvy a otáčivé pohyby základních částí stroje. Značení základních pohybů a jejich směrů měřeného stroje zobrazuje obrázek (obr. 11).



Obr. 11 Základní pohyby stroje WHQ 13 CNC [2]

X – příčný posuv stolu; Y – svislý posuv vřeteníku; Z – podélný posuv saní stolu;
W – výsuv pracovního vřetená; B – otáčení stolu; C – otáčení pracovního vřetená

Protože měřený stroj má vřeteno v horizontální poloze, musel být na pracovní stůl namontován upínací úhelník, aby bylo možno měření uskutečnit. Byl použit standardní upínací úhelník typ UU 950 zobrazený na obrázku (obr. 12), který je doplňkovým příslušenstvím tohoto stroje. Jeho technické parametry jsou uvedeny v tabulce (tab. 3).

Tab. 3 Technické parametry upínacího úhelníku [11]

Typ upínacího úhelníku	UU 950	Jednotky
Výška úhelníku	950	mm
Šířka upínací plochy	500	mm
Šířka základny	560	mm
Hloubka základny	500	mm
Počet T - drážek	6	
Rozteč T - drážek	160	mm
Hmotnost	600	kg



Obr. 12 Upínací úhelník UU 950

3.3 Postup měření

Samostatné měření se skládá z několika druhů úkonů, které se musí provést před měřením, během měření a po měření. Některé vedlejší úkony jsou popsány v této kapitole. Kompletní metodika měření je pak uvedena v následující kapitole 3.4.

3.3.1 Úkony před měřením

Před měřením je nutno nahrát do systému stroje odpovídající program, který bude použit při kontrolních měřeních v daných osách. Program je možno vygenerovat v softwaru daného měřicího systému Ballbar, pokud tuto funkci systém obsahuje. Dále je nutno zahřát stroj na provozní teplotu.

3.3.2 Úkony během měření

Tyto úkony se týkají hlavně bezpečnosti. V průběhu měření musí být dbáno na to, aby v blízkosti otáčejícího se stroje nebyly žádné osoby a předměty, u kterých by mohlo dojít ke kontaktu se strojem. Jelikož se jedná o pracoviště s nadměrným hlukem, musí být použita ochrana sluchu.

3.3.3 Úkony po skončení měření

Po skončení měření je nutno uklidit všechna zařízení a dbát na čistotu a pořádek. Musí být vypnuty hlavní vypínače a případně zastaven přívod stlačeného vzduchu.

3.4 Metodika měření

Při každém měření se používá určitý sled operací následujících po sobě v daném pořadí. Při kontrolním měření CNC obráběcího stroje v této práci je zvolena následující metodika měření a sestavena do těchto kroků:

- 1) Kontrola stroje před zkouškou.
- 2) Zapnutí stroje.
- 3) Zahřátí stroje na provozní teplotu.
- 4) Ustavení upínacího úhelníku na pracovní stůl stroje.
- 5) Nastavení údajů o stroji a typu měření v softwaru měřicího zařízení.
- 6) Vygenerování a nahrání programu do systému měřeného stroje.
- 7) Upnutí magnetického upínače do vřetena stroje.
- 8) Ustavení a upnutí magnetického upínače na určené místo upínacího úhelníku.
- 9) Očištění magnetických ploch upínačů pomocí čistící hmoty.
- 10) Nastavení nulového bodu a seřízení vzájemné polohy obou magnetických upínačů pomocí ustavovací kuličky.
- 11) Zapnutí lineárního snímače s kuličkami.
- 12) Spárování lineárního snímače s PC.
- 13) Kalibrace lineárního snímače pomocí přiloženého kalibrátoru.
- 14) Najetí vřetena do základní polohy pro start testu.
- 15) Vložení lineárního snímače mezi magnetické upínače.
- 16) Spuštění testu v softwaru měřicího zařízení.
- 17) Spuštění programu měřeného stroje.
- 18) Uložení naměřených hodnot do paměti softwaru měřicího zařízení po ukončení daného programu měřeného stroje.
- 19) Opakované měření (kroky 14 až 18).
- 20) Vyhodnocení měření.
- 21) Vypnutí lineárního snímače.
- 22) Odepnutí všech částí měřicího zařízení z měřeného stroje a uložení do kufříku.
- 23) Odepnutí upínacího úhelníku z pracovního stolu stroje.
- 24) Vypnutí měřeného stroje.

3.5 Průběh měření

V průběhu měření byla dodržována zvolená metodika měření. Během měření byly zachovávány určité podmínky. Teplota okolního prostředí se pohybovala v rozmezí $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ a provozní teplota stroje a měřicího přístroje se přibližně rovnala teplotě okolního prostředí. Protože bylo měření prováděno na více místech upínacího úhelníku, přičemž docházelo ke změně polohy magnetického upínače na tomto úhelníku, muselo být při těchto změnách prováděno nové nastavení nulového bodu a seřízení vzájemné polohy obou magnetických upínačů pomocí ustavovací kuličky.

3.6 Nejistoty měření

Cílem každého měření je vždy určit správnou hodnotu zjišťované veličiny. Při každém měření však dochází k nepřesnostem, které mohou způsobit různé vlivy. Tyto nepřesnosti ubírají výsledkům měření na jejich správnosti. Pro co nejpřesnější přiblížení se ke správné hodnotě měřené veličiny se používá parametr nejistota měření. Nejistota měření charakterizuje rozsah hodnot kolem výsledku měření, který můžeme přiřadit hodnotě měřené veličiny oprávněně. Aby tedy bylo dosaženo určité přesnosti měření a pravdivosti výsledků měření, je nutno do výsledků dané nejistoty vždy zahrnout.

Z důvodu zvýšení pravdivosti výsledků byly provedeny tři měření v každé poloze, ze kterých byly pro každou popisovanou chybu stroje vypočteny výběrové průměry, standardní nejistoty typu A (u_A) a následně rozšířené nejistoty typu A (u_{As}). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách při vyhodnocení měření v kapitole 4 a byly vypočítány podle následujících vztahů:

Výběrový průměr naměřené veličiny \bar{x}

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [13] \quad (3.6.1)$$

kde:

x_i jednotlivé naměřené hodnoty dané veličiny,

n počet měření ($n = 3$).

Standardní nejistota typu A (u_A)

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad [13] \quad (3.6.2)$$

kde:

$s(\bar{x})$ směrodatná odchylka,

\bar{x} výběrový průměr naměřené veličiny,

x_i jednotlivé naměřené hodnoty dané veličiny,

n počet měření ($n = 3$).

Protože bylo uskutečněno méně než deset opakovaných měření ($n = 3$), byla standardní nejistota typu A (u_A) ještě korigována koeficientem rozšíření k_s uvedeným v tabulce (tab. 4). Rozšířená nejistota typu A (u_{As}) tedy byla vypočítána podle vzorce:

Rozšířená nejistota typu A (u_{As})

$$u_{As} = k_s \times u_A \quad [13] \quad (3.6.3)$$

kde:

k_s koeficient rozšíření,

u_A standardní nejistota typu A.

Tab. 4 Hodnoty koeficientu rozšíření k_s [13]

Počet měření n	2	3	4	5	6	7	8	9	> 9
Koeficient rozšíření k_s	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0

3.6.1 Příklad výpočtu výběrového průměru a nejistoty měření

Pro názornost je uveden příklad výpočtu výsledné hodnoty včetně nejistoty pro obousměrnou odchylku kruhovitosti G(b) při měření v rovině XY 360° v horní poloze úhelníku. Jednotlivé naměřené a výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce (tab. 6).

Hodnoty pro názorný výpočet obousměrné odchylky kruhovitosti G(b)

H1 $x_1 = 21,6 \mu m$

H2 $x_2 = 21,2 \mu m$

H3 $x_3 = 20,5 \mu m$

$n = 3$

$k_s = 2,3$ (určeno dle tab. 4)

Výpočet výběrového průměru naměřené veličiny \bar{x}

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \bar{x} = \frac{x_1+x_2+x_3}{n} \quad (3.6.4)$$

Dosazení hodnot do vztahu

$$\bar{x} = \frac{21,6+21,2+20,5}{3} = \frac{63,3}{3} = 21,1 \mu m \quad (3.6.5)$$

Výpočet standardní nejistoty typu A (u_A)

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \rightarrow u_A = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (3.6.6)$$

Dosazení hodnot do vztahu

$$\begin{aligned} u_A &= \sqrt{\frac{(21,6 - 21,1)^2 + (21,2 - 21,1)^2 + (20,5 - 21,1)^2}{3 \times (3-1)}} = \\ &= \sqrt{\frac{(0,5)^2 + (0,1)^2 + (-0,6)^2}{3 \times 2}} = \\ &= \sqrt{\frac{0,25 + 0,01 + 0,36}{6}} = \sqrt{\frac{0,62}{6}} = \mathbf{0,321455025 \mu m} \end{aligned} \quad (3.6.7)$$

Výpočet rozšířené nejistoty typu A (u_{AS})

$$u_{AS} = k_s \times u_A \quad (3.6.8)$$

Dosazení hodnot do vztahu

$$u_{AS} = 2,3 \times 0,321455025 = \mathbf{0,739346558 \mu m} \quad (3.6.9)$$

Zaokrouhlení hodnoty nejistoty

$$u_{AS} = 0,739346558 \mu m \text{ po zaokrouhlení} \rightarrow \mathbf{0,8 \mu m} \quad (3.6.10)$$

Vyjádření výsledné hodnoty obousměrné odchylky kruhovitosti G(b) včetně nejistoty

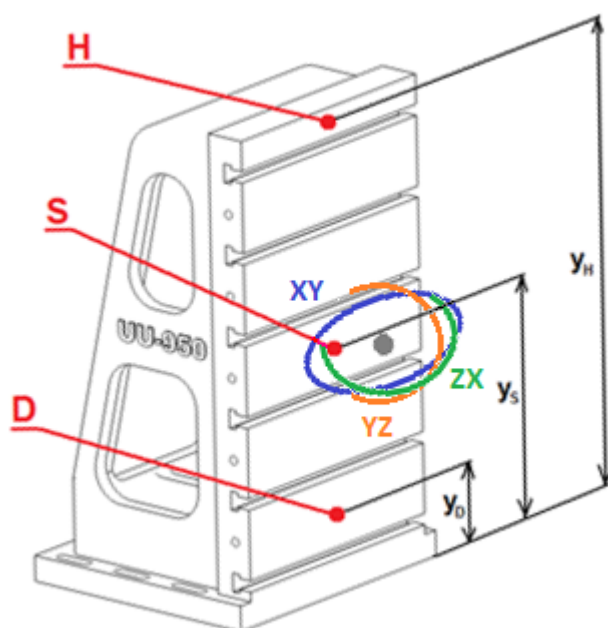
$$G(b) = \mathbf{(21,1 \pm 0,8) \mu m} \quad (3.6.11)$$

Protože jsou naměřené hodnoty uváděny v měřicích protokolech s přesností na jedno desetinné místo, bylo i z důvodu větší přehlednosti v tabulkách a dodržení stejného řádu

výsledku výběrového průměru zvoleno zaokrouhlení výsledné hodnoty nejistoty měření také na jedno desetinné místo.

4 Vyhodnocení měření

Měření je prováděno ve třech různých rovinách XY, YZ, ZX, přičemž v každé rovině jsou uskutečněny tři měření v každé ze tří určených poloh úhelníku. Jednotlivé polohy magnetického upínače na upínacím úhelníku, ve kterých bylo prováděno měření, jsou zobrazeny na obrázku (obr. 13). Magnetické upínače byly umísťovány vždy na střed úhelníku do určité vzdálenosti od pracovního stolu stroje. Označení poloh a jejich jednotlivé vzdálenosti jsou uvedeny v tabulce (tab. 5). Při všech měřeních byla použita nejmenší možná délka snímače 100 mm, což byl poloměr opisované kruhové dráhy. Pro všechna měření byla zvolena jednotná rychlost posuvu $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Koncepce stroje s vodorovně umístěným vřetenem umožňovalo kontrolu kruhové interpolace v rovině XY po 360° dráze, ale v rovinách YZ a ZX pouze po 220° dráze (obr. 13).



Obr. 13 Polohy umístění magnetického upínače při měření [12]

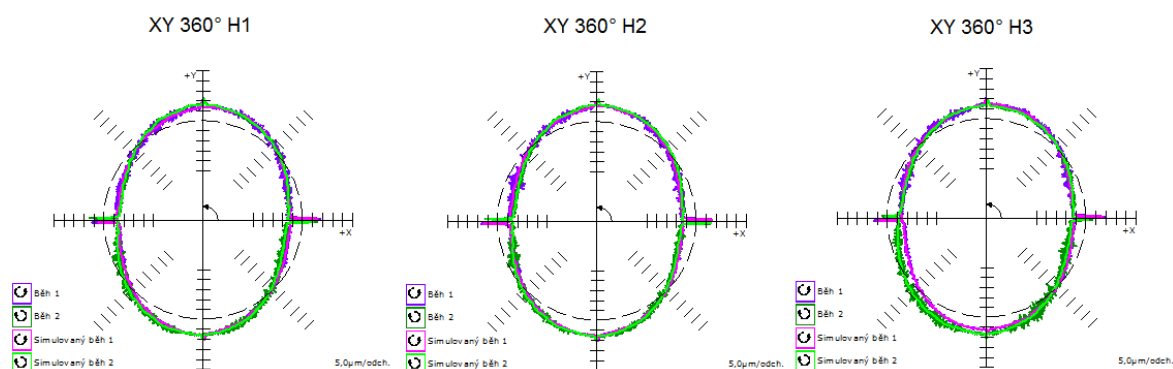
Tab. 5 Polohy magnetického upínače na upínacím úhelníku při měření

Poloha na upínacím úhelníku	Označení polohy při měření	Vzdálenost y [mm]
Horní	H	920
Střední	S	500
Dolní	D	150

Naměřené hodnoty ze všech měření jsou zaznamenány do jednotlivých tabulek, ve kterých jsou hodnoty daných chyb uváděny v jednotkách a také procentech. Procentuální hodnoty naznačují, která část celkové chyby kruhovitosti může být přiřazena každému z diagnostikovaných zdrojů chyb. Znamená to, že chyba s největší procentuální hodnotou má největší vliv na celkovou chybu kruhovitosti a naopak. Hodnoty byly do tabulek přeneseny z protokolů měření, jejichž ukázka je uvedena v příloze této práce. Hodnoty jsou také zobrazeny v grafech nasnímaných dat, které generuje software měřicího systému. Pro snadné rozeznání jednotlivých běhů ve směru a proti směru hodinových ručiček jsou použity v grafech rozdílné barvy. Vyhodnocování výsledných hodnot a grafů bylo prováděno v souladu s normou ČSN ISO 230-4.

4.1 Měření v rovině XY 360° H1; H2 a H3

Při tomto měření byl magnetický upínač umístěn v horní poloze úhelníku H ve výšce 920 mm od pracovního stolu stroje. Pro srovnání jsou grafy všech tří měření zobrazeny na obrázku (obr. 14) vedle sebe.



Obr. 14 Výsledné grafy měření v rovině XY 360° H1; H2 a H3 [14]

U všech grafů je zřetelně vidět oválný tvar elipsy podél osy Y v pozici 90°. Dle vyhodnocení měřicího zařízení se jedná o relativní chybu odměřování stroje neboli neshodu měřítka. Jelikož má tato chyba i nejvyšší procentuální hodnotu (viz tab. 6) má i největší vliv na celkovou kruhovitosť. Její záporná hodnota ukazuje na nedobíhavost dráhy a znamená, že osa Y přebíhá přes osu X. Krajním důsledkem této chyby mohou být vzniklé rozměrové odchylky u obrobených součástí na tomto stroji. Příčinou této chyby můžou být nesprávně nastavené parametry kompenzace lineární chyby, příliš napnutý nebo volný pásek měřítka nebo chybná osa kuličkového šroubu nebo dochází k jeho přehřívání a následně chybě rozteče. Pro odstranění této chyby je nutná kontrola těchto jmenovaných příčin a následná oprava nebo nastavení správných parametrů.

Další znatelně viditelnou chybou stroje v grafech jsou takzvané reverzační špičky, které jsou nejvíce patrné v ose X. V tabulce (tab. 6) je to opět procentově vysoko hodnocená chyba zpoždění serva v kladné i záporné ose X. Znamená to, že při pohybu po ose X v krajní poloze, kde by měl nastat plynulý přechod z jednoho směru do druhého, dojde k chvilkovému zastavení chodu. Při této chybě může docházet při obrábění pomocí kruhové interpolace k zanechání malých plošek na obráběném povrchu v místech, kde následují zpětné kroky. Příčiny této chyby mohou být vyvinutí pohonu osy v bodě obratu nepřiměřeného točivého momentu, nepřiměřená doba odezvy servosystému stroje u kompenzace axiální vůle nebo nedostatečná odezva servosystému v bodě obratu. Jelikož je tento stroj vybaven řídicím systémem, který disponuje nástroji pro eliminaci těchto špiček, můžeme tuto chybu odstranit pomocí nastavení kompenzací v řídicím systému. Dle hodnot uvedených v tabulce (tab. 6) je tato chyba indikována i v ose Y, kde však nedosahuje tak velkých hodnot ani procentuální váhy jako v ose X.

Tab. 6 Výsledné hodnoty měření v rovině XY 360° H1; H2 a H3

XY 360°	H1		H2		H3		Výsledek měření
	μm	%	μm	%	μm	%	μm
Relativní chyba odměřování	-29,1	37	-29,8	37	-27,6	39	-28,8 ± 1,5
Zpoždění serva X+	13,9	36	15,1	37	12,2	35	13,7 ± 0,9
Zpoždění serva X-	11,8	36	13,5	37	10,5	35	11,9 ± 1,8
Zpoždění serva Y+	3,3	8	3,0	7	3,3	9	3,2 ± 0,3
Zpoždění serva Y-	2,4	8	2,3	7	2,4	9	2,4 ± 0,1
Příčná vůle X+	1,5	4	0,7	3	0,4	1	0,9 ± 0,3
Příčná vůle X-	1,8	4	1,7	3	0,4	1	1,3 ± 1,1
	μm/m	%	μm/m	%	μm/m	%	μm/m
Kolmost	-23,1	6	-19,3	5	-16,3	5	-19,6 ± 4,5
Hodnoty dle ISO 230-4	μm		μm		μm		μm
Kruhovitost G proti směru	19,0		20,3		18,5		19,3 ± 1,3
Kruhovitost G ve směru	21,3		21,1		19,7		20,7 ± 0,6
Obousměrná kruhovitost G(b)	21,6		21,2		20,5		21,1 ± 0,8

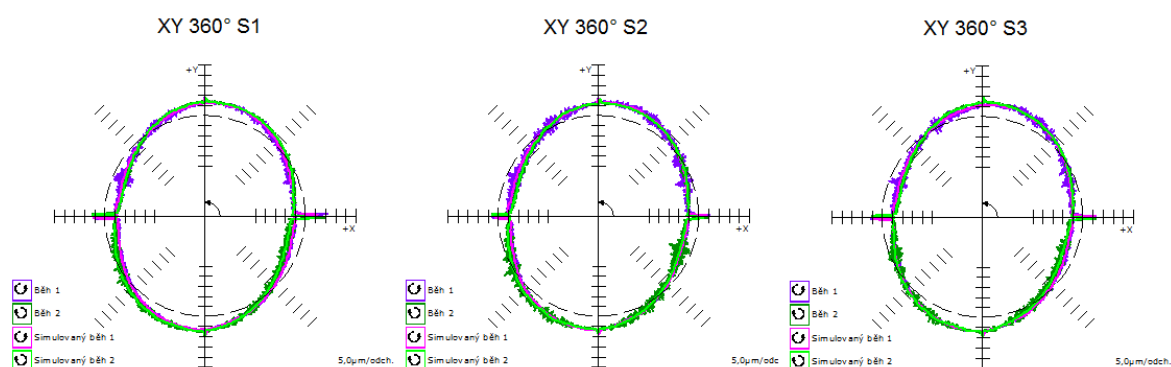
Z důvodu zobrazení grafu (obr. 14) v menším měřítku není moc patrná chyba kolmosti os stroje, avšak dle velikosti procentuální hodnoty v tabulce (tab. 6) má určitý vliv na celkovou kruhovitost. Záporná hodnota kolmosti značí úhel mezi dvěma kladnými směry os menší než 90°. V případě značné chyby kolmosti nelze při obrábění čelních ploch dosáhnout vzájemné kolmosti. Příčinou mohou být místně prohnuté osy, celková nevyrovnanost stroje nebo příliš opotřeбенé vedení stroje. Pro odstranění chyby je nutné provést kontrolu a případnou opravu nebo vyrovnaní stroje.

Další indikovaná chyba stroje nazývána jako příčná vůle v ose X není díky svým malým hodnotám v grafu znatelná. Kdyby tato chyba dosahovala vyšších hodnot, mělo by to za následek při obrábění kruhovou interpolací otvory nekruhového tvaru. Bývá způsobena boční vůlí ve vedení stroje a odstraňuje se opravou tohoto vedení.

V tabulce (tab. 6) jsou uvedeny výsledné hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4 včetně nejistoty měření.

4.2 Měření v rovině XY 360° S1; S2 a S3

Při tomto měření byl magnetický upínač umístěn ve střední poloze úhelníku S ve výšce 500 mm od pracovního stolu stroje. Pro srovnání jsou grafy všech tří měření zobrazeny na obrázku (obr. 15) vedle sebe.



Obr. 15 Výsledné grafy měření v rovině XY 360° S1; S2 a S3 [14]

U všech grafů je zřetelně vidět oválný tvar elipsy podél osy Y v pozici 90°. Dle vyhodnocení měřícího zařízení se jedná o relativní chybu odměřování stroje neboli neshodu měřítka. Jelikož má tato chyba i nejvyšší procentuální hodnotu (viz tab. 7) má i největší vliv na celkovou kruhovitost. Její záporná hodnota ukazuje na nedobíhavost dráhy a znamená, že osa Y přebíhá přes osu X. Krajním důsledkem této chyby mohou být vzniklé rozměrové odchylky u obrobků součástí na tomto stroji. Příčinou této chyby mohou být nesprávně nastavené parametry kompenzace lineární chyby, příliš napnutý nebo volný pásek měřítka nebo chybná osa kuličkového šroubu nebo dochází k jeho přehřívání a následně chybě rozteče. Pro odstranění této chyby je nutná kontrola těchto jmenovaných příčin a následná oprava nebo nastavení správných parametrů.

Další zřetelně viditelnou chybou stroje v grafech jsou takzvané reverzační špičky, které jsou nejvíce patrné v ose X. V tabulce (tab. 7) je to opět procentově vysoko hodnocená chyba zpoždění serva v kladné i záporné ose X. Znamená to, že při pohybu

po ose X v krajní poloze, kde by měl nastat plynulý přechod z jednoho směru do druhého, dojde k chvilkovému zastavení chodu. Při této chybě může docházet při obrábění pomocí kruhové interpolace k zanechání malých plošek na obráběném povrchu v místech, kde následují zpětné kroky. Příčiny této chyby mohou být vyvinutí pohonu osy v bodě obratu nepřiměřeného točivého momentu, nepřiměřená doba odezvy servosystému stroje u kompenzace axiální vůle nebo nedostatečná odezva servosystému v bodě obratu. Jelikož je tento stroj vybaven řídicím systémem, který disponuje nástroji pro eliminaci těchto špiček, můžeme tuto chybu odstranit pomocí nastavení kompenzací v řídicím systému. Dle hodnot uvedených v tabulce (tab. 7) je tato chyba indikována i v ose Y, kde však nedosahuje tak velkých hodnot ani procentuální váhy jako v ose X.

Tab. 7 Výsledné hodnoty měření v rovině XY 360° S1; S2 a S3

XY 360°	S1		S2		S3		Výsledek měření
	μm	%	μm	%	μm	%	μm
Relativní chyba odměřování	-25,1	33	-24,0	36	-24,2	34	-24,4 ± 0,8
Zpoždění serva X+	13,7	36	9,7	29	11,7	33	11,7 ± 2,7
Zpoždění serva X-	12,6	36	8,6	29	10,4	33	10,5 ± 2,7
Zpoždění serva Y+	2,1	6	1,9	6	2,2	6	2,1 ± 0,2
Zpoždění serva Y-	2,2	6	2,0	6	2,2	6	2,1 ± 0,2
Příčná vůle X+	1,7	3	0,4	2	0,9	2	1,0 ± 0,9
Příčná vůle X-	0,6	3	0,8	2	0,0	2	0,5 ± 0,6
	μm/m	%	μm/m	%	μm/m	%	μm/m
Kolmost	-39,1	10	-42,5	13	-43,5	12	-41,7 ± 3,1
Hodnoty dle ISO 230-4	μm		μm		μm		μm
Kruhovitost G proti směru	20,2		17,3		17,3		18,3 ± 2,3
Kruhovitost G ve směru	19,4		20,4		19,4		19,7 ± 0,8
Obousměrná kruhovitost G(b)	20,8		20,5		19,8		20,4 ± 0,7

Z důvodu zobrazení grafu (obr. 15) v menším měřítku není moc patrná chyba kolmosti os stroje, avšak dle velikosti procentuální hodnoty v tabulce (tab. 7) má určitý vliv na celkovou kruhovitost. Záporná hodnota kolmosti značí úhel mezi dvěma kladnými směry os menší než 90°. V případě značné chyby kolmosti nelze při obrábění čelních ploch dosáhnout vzájemné kolmosti. Příčinou mohou být místně prohnuté osy, celková nevyrovnanost stroje nebo příliš opotřeбенé vedení stroje. Pro odstranění chyby je nutné provést kontrolu a případnou opravu nebo vyrovnaní stroje.

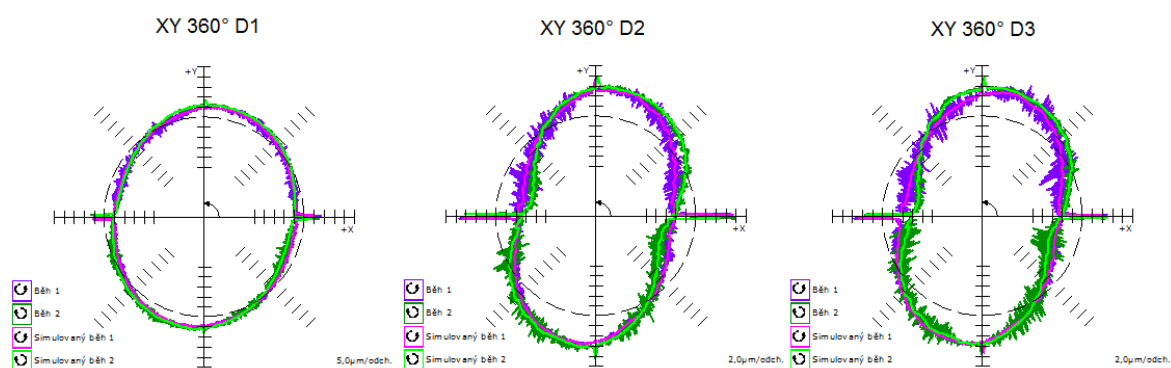
Další indikovaná chyba stroje nazývána jako příčná vůle v ose X není díky svým malým hodnotám v grafu znatelná. Kdyby tato chyba dosahovala vyšších hodnot, mělo by

to za následek při obrábění kruhovou interpolací otvory nekruhového tvaru. Bývá způsobena boční vůlí ve vedení stroje a odstraňuje se opravou tohoto vedení.

V tabulce (tab. 7) jsou uvedeny výsledné hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4 včetně nejistoty měření.

4.3 Měření v rovině XY 360° D1; D2 a D3

Při tomto měření byl magnetický upínač umístěn v dolní poloze úhelníku D ve výšce 150 mm od pracovního stolu stroje. Pro srovnání jsou grafy všech tří měření zobrazeny na obrázku (obr. 16) vedle sebe. Velké rozdíly mezi grafem D1 a grafy D2 a D3 jsou způsobeny odlišným měřítkem, kdy software zobrazil grafy D2 a D3 ve větším rozlišení. Je na nich vidět amplituda vibrací, které jsou indukovány ve stroji, ale které měřicí software nevyčísľuje.



Obr. 16 Výsledné grafy měření v rovině XY 360° D1; D2 a D3 [14]

U všech grafů je zřetelně (u grafu D2 a D3 ještě zřetelněji) vidět oválný tvar elipsy podél osy Y v pozici 90°. Dle vyhodnocení měřicího zařízení se jedná o relativní chybu odměřování stroje neboli neshodu měřítka. Jelikož má tato chyba druhou nejvyšší procentuální hodnotu (viz tab. 8) má i značný vliv na celkovou kruhovitosť. Její záporná hodnota ukazuje na nedobíhavost dráhy a znamená, že osa Y přebíhá přes osu X. Krajním důsledkem této chyby mohou být vzniklé rozměrové odchylky u obrobených součástí na tomto stroji. Příčinou této chyby můžou být nesprávně nastavené parametry kompenzace lineární chyby, příliš napnutý nebo volný pásek měřítka nebo chybná osa kuličkového šroubu nebo dochází k jeho přehřívání a následné chybě rozteče. Pro odstranění této chyby je nutná kontrola těchto jmenovaných příčin a následná oprava nebo nastavení správných parametrů.

Další znatelně viditelnou chybou stroje v grafech jsou takzvané reverzační špičky, které jsou nejvíce patrné v ose X. V tabulce (tab. 8) je to nejvýše procentově hodnocená chyba zpoždění serva v kladné i záporné ose X. Znamená to, že při pohybu po ose X v krajní poloze, kde by měl nastat plynulý přechod z jednoho směru do druhého, dojde k chvilkovému zastavení chodu. Při této chybě může docházet při obrábění pomocí kruhové interpolace k zanechání malých plošek na obráběném povrchu v místech, kde následují zpětné kroky. Příčiny této chyby mohou být vyvinutí pohonu osy v bodě obratu nepřiměřeného točivého momentu, nepřiměřená doba odezvy servosystému stroje u kompenzace axiální vůle nebo nedostatečná odezva servosystému v bodě obratu. Jelikož je tento stroj vybaven řídicím systémem, který disponuje nástroji pro eliminaci těchto špiček, můžeme tuto chybu odstranit pomocí nastavení kompenzací v řídicím systému. Dle hodnot uvedených v tabulce (tab. 8) je tato chyba indikována i v ose Y, kde však nedosahuje tak velkých hodnot ani procentuální váhy jako v ose X.

Tab. 8 Výsledné hodnoty měření v rovině XY 360° D1; D2 a D3

XY 360°	D1		D2		D3		Výsledek měření
	μm	%	μm	%	μm	%	μm
Relativní chyba odměřování	-20,1	31	-20,4	30	-19,7	32	-20,1 ± 0,5
Zpoždění serva X+	11,0	34	11,8	35	9,5	31	10,8 ± 1,6
Zpoždění serva X-	11,0	34	11,5	35	8,8	31	10,4 ± 1,9
Zpoždění serva Y+	1,6	6	2,0	6	2,1	7	1,9 ± 0,4
Zpoždění serva Y-	2,0	6	1,9	6	1,2	7	1,7 ± 0,6
Příčná vůle X+	1,7	4	0,9	3	0,1	5	0,9 ± 1,0
Příčná vůle X-	0,8	4	1,0	3	2,3	5	1,4 ± 1,1
	μm/m	%	μm/m	%	μm/m	%	μm/m
Kolmost	-43,7	13	-46,4	14	-43,4	14	-44,5 ± 2,2
Hodnoty dle ISO 230-4	μm		μm		μm		μm
Kruhovitost G proti směru	16,0		15,4		16,1		15,8 ± 0,5
Kruhovitost G ve směru	18,0		17,7		17,9		17,9 ± 0,2
Obousměrná kruhovitost G(b)	18,8		17,5		17,2		17,8 ± 1,2

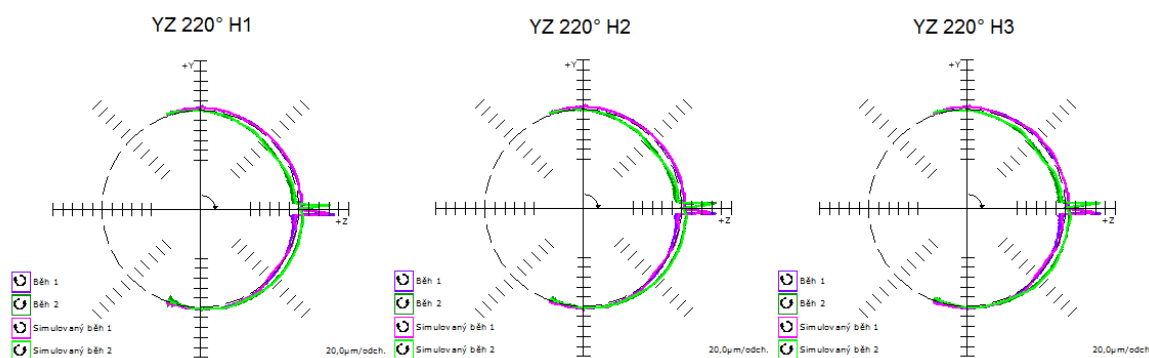
Díky tomu, že grafy D2 a D3 (obr. 16) jsou zobrazeny ve větším měřítku, můžeme na nich lépe vidět chybu kolmosti os stroje. Graf má oválný tvar s mírnou deformací na diagonále v úhlu 45°. Dle velikosti procentuální hodnoty v tabulce (tab. 8) má určitý vliv na celkovou kruhovitost. Záporná hodnota kolmosti značí úhel mezi dvěma kladnými směry os menší než 90°. V případě značné chyby kolmosti nelze při obrábění čelních ploch dosáhnout vzájemné kolmosti. Příčinou mohou být místně prohnuté osy, celková nevyrovnanost stroje nebo příliš opotřeбенé vedení stroje. Pro odstranění chyby je nutné provést kontrolu a případnou opravu nebo vyrovnaní stroje.

Další indikovaná chyba stroje nazývána jako příčná vůle v ose X není díky svým malým hodnotám v grafu znatelná. Kdyby tato chyba dosahovala vyšších hodnot, mělo by to za následek při obrábění kruhovou interpolací otvory nekruhového tvaru. Bývá způsobena boční vůlí ve vedení stroje a odstraňuje se opravou tohoto vedení.

V tabulce (tab. 8) jsou uvedeny výsledné hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4 včetně nejistoty měření.

4.4 Měření v rovině YZ 220° H1; H2 a H3

Při tomto měření byl magnetický upínač umístěn v horní poloze úhelníku H ve výšce 920 mm od pracovního stolu stroje. Pro srovnání jsou grafy všech tří měření zobrazeny na obrázku (obr. 17) vedle sebe.



Obr. 17 Výsledné grafy měření v rovině YZ 220° H1; H2 a H3 [14]

V grafech měření v této ose je znatelně viditelnou chybou stroje takzvaná reverzační špička, která je nejvíce patrná v ose Z a to pouze v kladném směru, protože dráha neopisuje kompletní kruh. V tabulce (tab. 9) je to procentově nejvýše hodnocená chyba zpoždění serva v ose Z+. Znamená to, že při pohybu po ose Z v krajní poloze, kde by měl nastat plynulý přechod z jednoho směru do druhého, dojde k chvilkovému zastavení chodu. Při této chybě může docházet při obrábění pomocí kruhové interpolace k zanechání malých plošek na obráběném povrchu v místech, kde následují zpětné kroky. Příčiny této chyby mohou být vyvinutí pohonu osy v bodě obratu nepřiměřeného točivého momentu, nepřiměřená doba odezvy servosystému stroje u kompenzace axiální vůle nebo nedostatečná odezva servosystému v bodě obratu. Jelikož je tento stroj vybaven řídicím systémem, který disponuje nástroji pro eliminaci těchto špiček, můžeme tuto chybu odstranit pomocí nastavení kompenzací v řídicím systému. Dle hodnot uvedených

v tabulce (tab. 9) je tato chyba indikována i v ose Y, kde však nedosahuje tak velkých hodnot ani procentuální váhy jako v ose Z.

Tab. 9 Výsledné hodnoty měření v rovině YZ 220° H1; H2 a H3

YZ 220°	H1		H2		H3		Výsledek měření
	μm	%	μm	%	μm	%	μm
Zpoždění serva Z+	68,5	60	61,1	57	70,0	57	66,5 ± 6,4
Zpoždění serva Y+	3,4	3	2,8	3	2,7	2	3,0 ± 0,5
Zpoždění serva Y-	2,2	3	1,9	3	2,2	2	2,1 ± 0,3
Příčná vůle Z+	6,1	4	6,8	5	6,7	5	6,5 ± 0,7
Příčná vůle Z-	3,0	4	4,1	5	4,1	5	3,7 ± 0,9
	μm/m	%	μm/m	%	μm/m	%	μm/m
Kolmost	92,7	8	88,2	8	89,1	7	90,0 ± 3,2
Hodnoty dle ISO 230-4	μm		μm		μm		μm
Kruhovitost G proti směru	83,5		84,8		84,3		84,2 ± 0,9
Kruhovitost G ve směru	87,5		82,8		84,6		85,0 ± 3,2
Obousměrná kruhovitost G(b)	88,7		84,8		84,8		86,1 ± 3,0

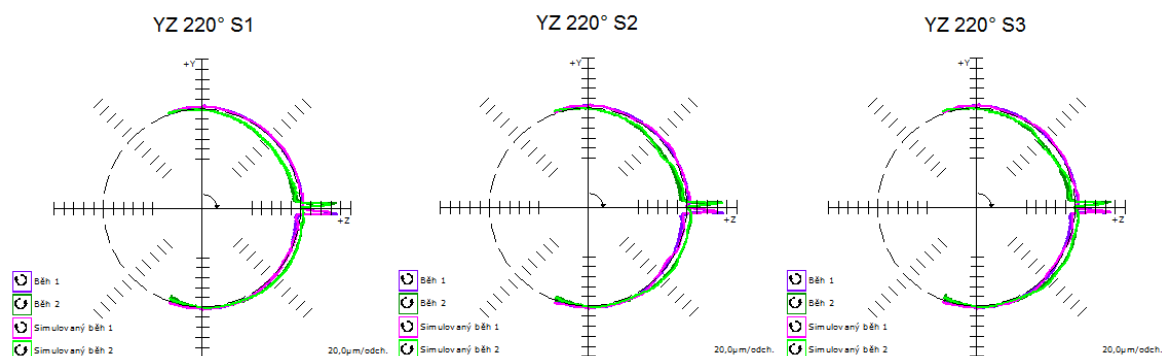
Z důvodu zobrazení grafu (obr. 17) v menším měřítku není moc patrná chyba kolmosti os stroje, avšak dle velikosti procentuální hodnoty v tabulce (tab. 9) má určitý vliv na celkovou kruhovitost. Kladná hodnota kolmosti značí úhel mezi dvěma kladnými směry os větší než 90°. V případě značné chyby kolmosti nelze při obrábění čelních ploch dosáhnout vzájemné kolmosti. Příčinou mohou být místně prohnuté osy, celková nevyrovnanost stroje nebo příliš opotřeбенé vedení stroje. Pro odstranění chyby je nutné provést kontrolu a případnou opravu nebo vyrovnaní stroje.

Další indikovaná chyba stroje, která je nazvána jako příčná vůle v ose Z, je díky svým nízkým hodnotám v grafu opět málo znatelná. Je zobrazena jako vzájemný posun drah v ose Z. Kdyby tato chyba dosahovala vyšších hodnot, mělo by to za následek při obrábění kruhovou interpolací otvory nekrhového tvaru. Bývá způsobena boční vůlí ve vedení stroje a odstraňuje se opravou tohoto vedení.

V tabulce (tab. 9) jsou uvedeny výsledné hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4 včetně nejistoty měření.

4.5 Měření v rovině YZ 220° S1; S2 a S3

Při tomto měření byl magnetický upínač umístěn ve střední poloze úhelníku S ve výšce 500 mm od pracovního stolu stroje. Pro srovnání jsou grafy všech tří měření zobrazeny na obrázku (obr. 18) vedle sebe.



Obr. 18 Výsledné grafy měření v rovině YZ 220° S1; S2 a S3 [14]

V grafech měření v této ose je znatelně viditelnou chybou stroje takzvaná reverzační špička, která je nejvíce patrná v ose Z a to pouze v kladném směru, protože dráha neopisuje kompletní kruh. V tabulce (tab. 10) je to procentově nejvýše hodnocená chyba zpoždění serva v ose Z+. Znamená to, že při pohybu po ose Z v krajní poloze, kde by měl nastat plynulý přechod z jednoho směru do druhého, dojde k chvilkovému zastavení chodu. Při této chybě může docházet při obrábění pomocí kruhové interpolace k zanechání malých plošek na obráběném povrchu v místech, kde následují zpětné kroky. Příčiny této chyby mohou být vyvinutí pohonu osy v bodě obratu nepřiměřeného točivého momentu, nepřiměřená doba odezvy servosystému stroje u kompenzace axiální vůle nebo nedostatečná odezva servosystému v bodě obratu. Jelikož je tento stroj vybaven řídicím systémem, který disponuje nástroji pro eliminaci těchto špiček, můžeme tuto chybu odstranit pomocí nastavení kompenzací v řídicím systému. Dle hodnot uvedených v tabulce (tab. 10) je tato chyba indikována i v ose Y, kde však nedosahuje tak velkých hodnot ani procentuální váhy jako v ose Z.

Z důvodu zobrazení grafu (obr. 18) v menším měřítku není moc patrná chyba kolmosti os stroje, avšak dle velikosti procentuální hodnoty v tabulce (tab. 10) má určitý vliv na celkovou kruhovitost. Kladná hodnota kolmosti značí úhel mezi dvěma kladnými směry os větší než 90°. V případě značné chyby kolmosti nelze při obrábění čelních ploch dosáhnout vzájemné kolmosti. Příčinou mohou být místně prohnuté osy, celková nevyrovnanost stroje nebo příliš opotřeбенé vedení stroje. Pro odstranění chyby je nutné provést kontrolu a případnou opravu nebo vyrovnaní stroje.

Tab. 10 Výsledné hodnoty měření v rovině YZ 220° S1; S2 a S3

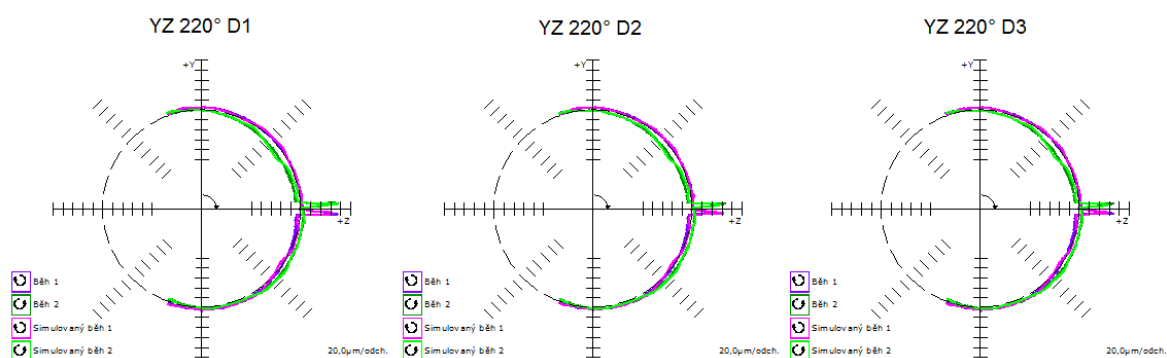
YZ 220°	S1		S2		S3		Výsledek měření
	μm	%	μm	%	μm	%	μm
Zpoždění serva Z+	63,0	63	72,0	57	70,4	57	68,5 ± 6,4
Zpoždění serva Y+	2,4	2	2,1	2	1,5	2	1,7 ± 0,8
Zpoždění serva Y-	2,0	2	1,8	2	2,0	2	1,9 ± 0,2
Příčná vůle Z+	4,8	5	6,7	5	5,7	4	5,7 ± 1,3
Příčná vůle Z-	4,9	5	4,9	5	4,4	4	4,7 ± 0,4
	μm/m	%	μm/m	%	μm/m	%	μm/m
Kolmost	91,1	9	83,3	7	89,1	7	87,8 ± 5,4
Hodnoty dle ISO 230-4	μm		μm		μm		μm
Kruhovitost G proti směru	89,9		85,2		89,5		88,2 ± 3,5
Kruhovitost G ve směru	84,8		85,2		84,4		84,8 ± 0,3
Obousměrná kruhovitost G(b)	89,9		86,6		89,2		88,6 ± 2,3

Další indikovaná chyba stroje, která je nazvána jako příčná vůle v ose Z, je díky svým nízkým hodnotám v grafu opět málo znatelná. Je zobrazena jako vzájemný posun drah v ose Z. Kdyby tato chyba dosahovala vyšších hodnot, mělo by to za následek při obrábění kruhovou interpolací otvory nekruhového tvaru. Bývá způsobena boční vůlí ve vedení stroje a odstraňuje se opravou tohoto vedení.

V tabulce (tab. 10) jsou uvedeny výsledné hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4 včetně nejistoty měření.

4.6 Měření v rovině YZ 220° D1; D2 a D3

Při tomto měření byl magnetický upínač umístěn v dolní poloze úhelníku D ve výšce 150 mm od pracovního stolu stroje. Pro srovnání jsou grafy všech tří měření zobrazeny na obrázku (obr. 19) vedle sebe.



Obr. 19 Výsledné grafy měření v rovině YZ 220° D1; D2 a D3 [14]

V grafech měření v této ose je znatelně viditelnou chybou stroje takzvaná reverzační špička, která je nejvíce patrná v ose Z a to pouze v kladném směru, protože dráha neopisuje kompletní kruh. V tabulce (tab. 11) je to procentově nejvýše hodnocená chyba zpoždění serva v ose Z+. Znamená to, že při pohybu po ose Z v krajní poloze, kde by měl nastat plynulý přechod z jednoho směru do druhého, dojde k chvilkovému zastavení chodu. Při této chybě může docházet při obrábění pomocí kruhové interpolace k zanechání malých plošek na obráběném povrchu v místech, kde následují zpětné kroky. Příčiny této chyby mohou být vyvinutí pohonu osy v bodě obratu nepřiměřeného točivého momentu, nepřiměřená doba odezvy servosystému stroje u kompenzace axiální vůle nebo nedostatečná odezva servosystému v bodě obratu. Jelikož je tento stroj vybaven řídicím systémem, který disponuje nástroji pro eliminaci těchto špiček, můžeme tuto chybu odstranit pomocí nastavení kompenzací v řídicím systému. Dle hodnot uvedených v tabulce (tab. 11) je tato chyba indikována i v ose Y, kde však nedosahuje tak velkých hodnot ani procentuální váhy jako v ose Z.

Z důvodu zobrazení grafu (obr. 19) v menším měřítku není moc patrná chyba kolmosti os stroje, avšak dle velikosti procentuální hodnoty v tabulce (tab. 11) má určitý vliv na celkovou kruhovitost. Kladná hodnota kolmosti značí úhel mezi dvěma kladnými směry os větší než 90°. V případě značné chyby kolmosti nelze při obrábění čelních ploch dosáhnout vzájemné kolmosti. Příčinou mohou být místně prohnuté osy, celková nevyrovnanost stroje nebo příliš opotřeбенé vedení stroje. Pro odstranění chyby je nutné provést kontrolu a případnou opravu nebo vyrovnaní stroje.

Tab. 11 Výsledné hodnoty měření v rovině YZ 220° D1; D2 a D3

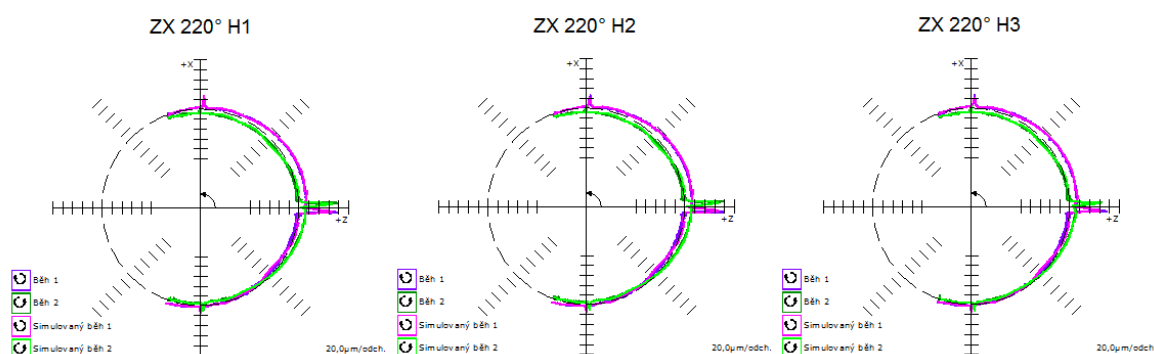
YZ 220°	D1		D2		D3		Výsledek měření
	μm	%	μm	%	μm	%	μm
Zpoždění serva Z+	76,2	60	66,5	59	61,7	57	68,1 ± 9,8
Zpoždění serva Y+	2,0	2	2,1	2	2,2	2	2,1 ± 0,2
Zpoždění serva Y-	2,0	2	2,3	2	2,1	2	2,1 ± 0,2
Příčná vůle Z+	7,6	5	6,8	5	7,6	6	7,3 ± 0,6
Příčná vůle Z-	4,8	5	3,7	5	3,8	6	4,1 ± 0,8
	μm/m	%	μm/m	%	μm/m	%	μm/m
Kolmost	86,8	7	86,6	8	88,5	8	87,3 ± 1,1
Hodnoty dle ISO 230-4	μm		μm		μm		μm
Kruhovitost G proti směru	86,6		78,6		81,3		82,2 ± 5,4
Kruhovitost G ve směru	84,8		72,6		78,4		78,6 ± 8,1
Obousměrná kruhovitost G(b)	87,2		78,6		80,9		82,2 ± 5,9

Další indikovaná chyba stroje, která je nazvána jako příčná vůle v ose Z, je díky svým nízkým hodnotám v grafu opět málo znatelná. Je zobrazena jako vzájemný posun drah v ose Z. Kdyby tato chyba dosahovala vyšších hodnot, mělo by to za následek při obrábění kruhovou interpolací otvory nekruhového tvaru. Bývá způsobena boční vůlí ve vedení stroje a odstraňuje se opravou tohoto vedení.

V tabulce (tab. 11) jsou uvedeny výsledné hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4 včetně nejistoty měření.

4.7 Měření v rovině ZX 220° H1; H2 a H3

Při tomto měření byl magnetický upínač umístěn v horní poloze úhelníku H ve výšce 920 mm od pracovního stolu stroje. Pro srovnání jsou grafy všech tří měření zobrazeny na obrázku (obr. 20) vedle sebe.



Obr. 20 Výsledné grafy měření v rovině ZX 220° H1; H2 a H3 [14]

V grafech měření v této ose je znatelně viditelnou chybou stroje takzvaná reverzační špička, která je nejvíce patrná v ose Z a to pouze v kladném směru, protože dráha neopisuje kompletní kruh. V tabulce (tab. 12) je to procentově nejvýše hodnocená chyba zpoždění serva v ose Z+. Znamená to, že při pohybu po ose Z v krajní poloze, kde by měl nastat plynulý přechod z jednoho směru do druhého, dojde k chvilkovému zastavení chodu. Při této chybě může docházet při obrábění pomocí kruhové interpolace k zanechání malých plošek na obráběném povrchu v místech, kde následují zpětné kroky. Příčiny této chyby mohou být vyvinutí pohonu osy v bodě obratu nepřiměřeného točivého momentu, nepřiměřená doba odezvy servosystému stroje u kompenzace axiální vůle nebo nedostatečná odezva servosystému v bodě obratu. Jelikož je tento stroj vybaven řídicím systémem, který disponuje nástroji pro eliminaci těchto špiček, můžeme tuto chybu odstranit pomocí nastavení kompenzací v řídicím systému. Dle hodnot uvedených

v tabulce (tab. 12) je tato chyba indikována i v ose X, kde má také značný procentuální vliv na celkovou kruhovitost podobně jako v ose Z.

Tab. 12 Výsledné hodnoty měření v rovině ZX 220° H1; H2 a H3

ZX 220°	H1		H2		H3		Výsledek měření
	μm	%	μm	%	μm	%	μm
Zpoždění serva Z+	64,5	50	65,0	51	63,8	53	64,4 ± 0,8
Zpoždění serva X+	19,7	15	17,9	14	17,7	15	18,4 ± 1,5
Zpoždění serva X-	14,6	15	15,1	14	15,0	15	14,9 ± 0,4
Příčná vůle Z+	10,1	7	9,6	7	9,4	7	9,7 ± 0,5
Příčná vůle Z-	8,4	7	8,5	7	6,8	7	7,9 ± 1,3
	μm/m	%	μm/m	%	μm/m	%	μm/m
Kolmost	-69,3	5	-72,1	6	-69,5	6	-70,3 ± 2,1
Hodnoty dle ISO 230-4	μm		μm		μm		μm
Kruhovitost G proti směru	83,5		86,4		71,1		80,3 ± 10,8
Kruhovitost G ve směru	84,5		86,1		82,6		84,4 ± 2,4
Obousměrná kruhovitost G(b)	85,4		86,7		82,7		84,9 ± 2,7

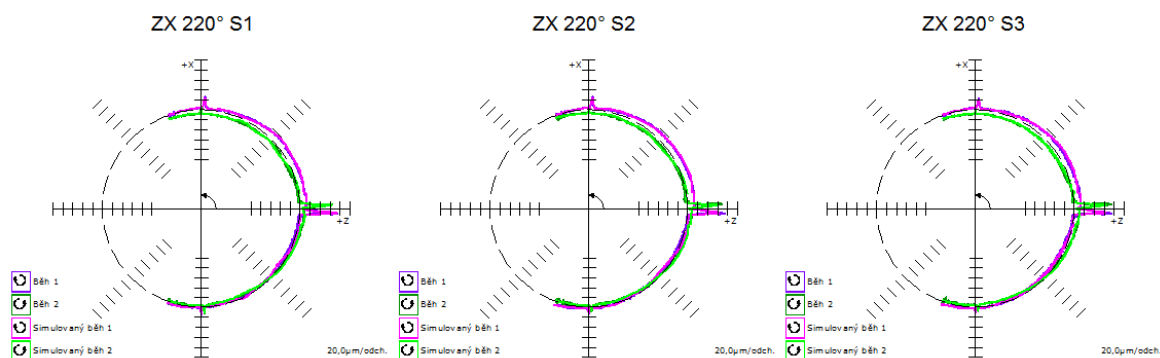
Z důvodu zobrazení grafu (obr. 20) v menším měřítku není moc patrná chyba kolmosti os stroje, avšak dle velikosti procentuální hodnoty v tabulce (tab. 12) má určitý vliv na celkovou kruhovitost. Záporná hodnota kolmosti značí úhel mezi dvěma kladnými směry os menší než 90°. V případě značné chyby kolmosti nelze při obrábění čelních ploch dosáhnout vzájemné kolmosti. Příčinou mohou být místně prohnuté osy, celková nevyrovnanost stroje nebo příliš opotřeбенé vedení stroje. Pro odstranění chyby je nutné provést kontrolu a případnou opravu nebo vyrovnaní stroje.

Další indikovaná chyba stroje, která je nazvána jako příčná vůle v ose Z, je díky svým nízkým hodnotám v grafu opět málo znatelná. Je zobrazena jako vzájemný posun drah v ose Z. Kdyby tato chyba dosahovala vyšších hodnot, mělo by to za následek při obrábění kruhovou interpolací otvory nekruhového tvaru. Bývá způsobena boční vůlí ve vedení stroje a odstraňuje se opravou tohoto vedení.

V tabulce (tab. 12) jsou uvedeny výsledné hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4 včetně nejistoty měření.

4.8 Měření v rovině ZX 220° S1; S2 a S3

Při tomto měření byl magnetický upínač umístěn ve střední poloze úhelníku S ve výšce 500 mm od pracovního stolu stroje. Pro srovnání jsou grafy všech tří měření zobrazeny na obrázku (obr. 21) vedle sebe.



Obr. 21 Výsledné grafy měření v rovině ZX 220° S1; S2 a S3 [14]

V grafech měření v této ose je znatelně viditelnou chybou stroje takzvaná reverzační špička, která je nejvíce patrná v ose Z a to pouze v kladném směru, protože dráha neopisuje kompletní kruh. V tabulce (tab. 13) je to procentově nejvýše hodnocená chyba zpoždění serva v ose Z+. Znamená to, že při pohybu po ose Z v krajní poloze, kde by měl nastat plynulý přechod z jednoho směru do druhého, dojde k chvilkovému zastavení chodu. Při této chybě může docházet při obrábění pomocí kruhové interpolace k zanechání malých plošek na obráběném povrchu v místech, kde následují zpětné kroky. Příčiny této chyby mohou být vyvinutí pohonu osy v bodě obratu nepřiměřeného točivého momentu, nepřiměřená doba odezvy servosystému stroje u kompenzace axiální vůle nebo nedostatečná odezva servosystému v bodě obratu. Jelikož je tento stroj vybaven řídicím systémem, který disponuje nástroji pro eliminaci těchto špiček, můžeme tuto chybu odstranit pomocí nastavení kompenzací v řídicím systému. Dle hodnot uvedených v tabulce (tab. 13) je tato chyba indikována i v ose X, kde má také značný procentuální vliv na celkovou kruhovitost podobně jako v ose Z.

Z důvodu zobrazení grafu (obr. 21) v menším měřítku není moc patrná chyba kolmosti os stroje, avšak dle velikosti procentuální hodnoty v tabulce (tab. 13) má určitý vliv na celkovou kruhovitost. Záporná hodnota kolmosti značí úhel mezi dvěma kladnými směry os menší než 90°. V případě značné chyby kolmosti nelze při obrábění čelních ploch dosáhnout vzájemné kolmosti. Příčinou mohou být místně prohnuté osy, celková nevyrovnanost stroje nebo příliš opotřeбенé vedení stroje. Pro odstranění chyby je nutné provést kontrolu a případnou opravu nebo vyrovnaní stroje.

Tab. 13 Výsledné hodnoty měření v rovině ZX 220° S1; S2 a S3

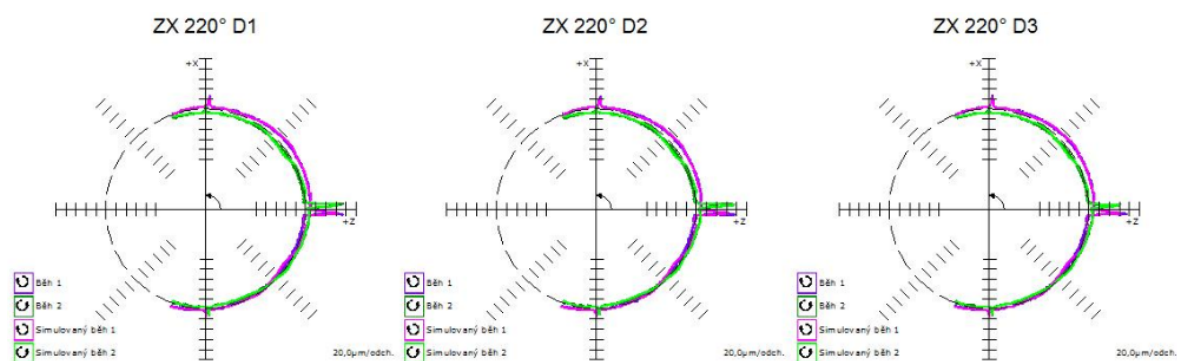
ZX 220°	S1		S2		S3		Výsledek měření
	μm	%	μm	%	μm	%	μm
Zpoždění serva Z+	73,7	56	61,0	52	60,7	56	65,1 ± 9,9
Zpoždění serva X+	18,9	14	15,4	13	14,5	13	16,3 ± 3,1
Zpoždění serva X-	14,3	14	11,1	13	10,4	13	11,9 ± 2,8
Příčná vůle Z+	9,7	6	6,8	6	9,6	8	8,7 ± 2,2
Příčná vůle Z-	7,0	6	7,2	6	8,2	8	7,5 ± 0,9
	μm/m	%	μm/m	%	μm/m	%	μm/m
Kolmost	-64,3	5	-57,7	5	-56,0	5	-59,3 ± 5,9
Hodnoty dle ISO 230-4	μm		μm		μm		μm
Kruhovitost G proti směru	70,9		77,4		83,4		77,2 ± 8,3
Kruhovitost G ve směru	78,3		78,8		82,1		79,7 ± 2,8
Obousměrná kruhovitost G(b)	82,3		83,0		84,7		83,3 ± 1,7

Další indikovaná chyba stroje, která je nazvána jako příčná vůle v ose Z, je díky svým nízkým hodnotám v grafu opět málo znatelná. Je zobrazena jako vzájemný posun drah v ose Z. Kdyby tato chyba dosahovala vyšších hodnot, mělo by to za následek při obrábění kruhovou interpolací otvory nekruhového tvaru. Bývá způsobena boční vůlí ve vedení stroje a odstraňuje se opravou tohoto vedení.

V tabulce (tab. 13) jsou uvedeny výsledné hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4 včetně nejistoty měření.

4.9 Měření v rovině ZX 220° D1; D2 a D3

Při tomto měření byl magnetický upínač umístěn v dolní poloze úhelníku D ve výšce 150 mm od pracovního stolu stroje. Pro srovnání jsou grafy všech tří měření zobrazeny na obrázku (obr. 22) vedle sebe.



Obr. 22 Výsledné grafy měření v rovině ZX 220° D1; D2 a D3 [14]

V grafech měření v této ose je znatelně viditelnou chybou stroje takzvaná reverzační špička, která je nejvíce patrná v ose Z a to pouze v kladném směru, protože dráha neopisuje kompletní kruh. V tabulce (tab. 14) je to procentově nejvýše hodnocená chyba zpoždění serva v ose Z+. Znamená to, že při pohybu po ose Z v krajní poloze, kde by měl nastat plynulý přechod z jednoho směru do druhého, dojde k chvilkovému zastavení chodu. Při této chybě může docházet při obrábění pomocí kruhové interpolace k zanechání malých plošek na obráběném povrchu v místech, kde následují zpětné kroky. Příčiny této chyby mohou být vyvinutí pohonu osy v bodě obratu nepřiměřeného točivého momentu, nepřiměřená doba odezvy servosystému stroje u kompenzace axiální vůle nebo nedostatečná odezva servosystému v bodě obratu. Jelikož je tento stroj vybaven řídicím systémem, který disponuje nástroji pro eliminaci těchto špiček, můžeme tuto chybu odstranit pomocí nastavení kompenzací v řídicím systému. Dle hodnot uvedených v tabulce (tab. 14) je tato chyba indikována i v ose X, kde má také značný procentuální vliv na celkovou kruhovitost podobně jako v ose Z.

Tab. 14 Výsledné hodnoty měření v rovině ZX 220° D1; D2 a D3

ZX 220°	D1		D2		D3		Výsledek měření
	μm	%	μm	%	μm	%	μm
Zpoždění serva Z+	63,2	51	71,8	55	64,8	53	66,6 ± 6,1
Zpoždění serva X+	17,6	14	16,7	13	17,1	14	17,1 ± 0,6
Zpoždění serva X-	13,8	14	14,4	13	13,7	14	14,0 ± 0,5
Příčná vůle Z+	9,1	7	8,7	6	7,2	6	8,3 ± 1,4
Příčná vůle Z-	8,5	7	8,4	6	7,7	6	8,2 ± 0,6
	μm/m	%	μm/m	%	μm/m	%	μm/m
Kolmost	-58,0	5	-59,0	4	-53,3	4	-56,8 ± 4,1
Hodnoty dle ISO 230-4	μm		μm		μm		μm
Kruhovitost G proti směru	79,2		81,8		67,4		76,1 ± 10,2
Kruhovitost G ve směru	79,7		72,6		80,4		77,6 ± 5,8
Obousměrná kruhovitost G(b)	81,3		83,0		82,3		82,2 ± 1,2

Z důvodu zobrazení grafu (obr. 22) v menším měřítku není moc patrná chyba kolmosti os stroje, avšak dle velikosti procentuální hodnoty v tabulce (tab. 14) má určitý vliv na celkovou kruhovitost. Záporná hodnota kolmosti značí úhel mezi dvěma kladnými směry os menší než 90°. V případě značné chyby kolmosti nelze při obrábění čelních ploch dosáhnout vzájemné kolmosti. Příčinou mohou být místně prohnuté osy, celková nevyrovnanost stroje nebo příliš opotřeбенé vedení stroje. Pro odstranění chyby je nutné provést kontrolu a případnou opravu nebo vyrovnaní stroje.

Další indikovaná chyba stroje, která je nazvána jako příčná vůle v ose Z, je díky svým nízkým hodnotám v grafu opět málo znatelná. Je zobrazena jako vzájemný posun drah v ose Z. Kdyby tato chyba dosahovala vyšších hodnot, mělo by to za následek při obrábění kruhovou interpolací otvory nekruhového tvaru. Bývá způsobena boční vůlí ve vedení stroje a odstraňuje se opravou tohoto vedení.

V tabulce (tab. 14) jsou uvedeny výsledné hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4 včetně nejistoty měření.

4.10 Výsledné vyhodnocení všech měření

Mezi jednotlivými měřeními v příslušných osách byly získány srovnatelné grafické i tabulkové hodnoty, což poukazuje na správnost provedeného měření. Jako chyby stroje s největší hodnotou odchylek, které byly prokázány při měření v rovině XY, jsou vyhodnoceny relativní chyba odměřování a chyba zpoždění serva v ose X. Při měřeních v rovinách YZ a ZX byla nejvíce obsažena chyba stroje zpoždění serva v ose Z. Tyto chyby by mohly vzhledem k jejich hodnotám ovlivnit kvalitu povrchu obráběných součástí s velkou přesností na tomto stroji. Pro odstranění těchto chyb bude potřeba provést kontrolu odměřování a kompenzace reverzních špiček v řídicím systému a následné provedení nového kontrolního měření.

5 Závěr a doporučení

V této práci bylo provedeno měření CNC obráběcího stroje měřícím systémem Ballbar ve třech rovinách (XY, YZ, ZX) a třech polohách upínacího úhelníku umístěného na pracovním stole stroje. Jednotlivá měření byla vždy opakována třikrát. Výsledky byly vyhodnocovány pomocí grafů a tabulek. Při měření v rovině XY byly vyhodnoceny jako největší chyby stroje relativní chyba odměřování a chyba zpoždění serva v ose X. Při měření v rovinách YZ a ZX to byla zase chyba stroje zpoždění serva v ose Z.

Dle získaných výsledků z provedených měření kruhové interpolace v této práci lze vyhodnotit až na výhrady, že celkový stav měřeného stroje je vyhovující pro výrobní provoz. Z této práce vyplývá, že měření přesnosti obráběcích strojů pomocí Ballbar systému je významným diagnostickým nástrojem pro zjišťování chyb obráběcího stroje a vyhodnocování jeho stavu.

Doporučení je se u tohoto stroje zaměřit na odchylky uvedené při výsledném hodnocení v kapitole 4.10 a provést jejich bližší diagnostiku a případnou opravu. Může se tak zamezit vzniku vážnějších závad, které by mohly z těchto zjištěných chyb stroje vyplynout. Je doporučeno striktně dodržovat intervaly kontrol stanovené výrobcem u všech obráběcích strojů, čímž je možno předejít vzniku vážnějších závad, které by mohly vést k vyřazení stroje z provozu. Toto by pak mělo za následek zastavení produkce na tomto stroji a tím způsobený ušlý zisk, nehledě na finanční náročnost u velkých oprav stroje.

Dále je doporučeno zopakování kontrolního měření na tomto stroji za dobu jednoho roku, kdy by mohly být porovnány nově získané hodnoty s hodnotami v této práci a vyhodnocen tak celkový stav stroje po uplynutí této doby.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Kratochvílovi, Ph.D. za uskutečnění a asistenci při provedeném měření a za poskytnuté konzultace k této práci. Děkuji také firmě VOP CZ, s.p. za poskytnutí prostoru pro provedení měření na daném stroji.

6 Seznam použité literatury a zdrojů

Literatura

- [1] BRYCHTA, J.: *Obrábění I, Návod pro cvičení 1. část*, Ostrava 2004, druhé vydání, 84 s, ISBN 80-248-0576-6.
- [2] fa TOS VARNSDORF a.s.: *Návod k obsluze stroje WHN(Q) 13 CNC*, 2011, dvacáté osmé vydání.
- [3] ČSN ISO 10791-8. *Podmínky zkoušek pro obráběcí centra – Část 8: Vyhodnocení vlastností interpolace ve třech souřadných rovinách*. Praha: Český normalizační institut, 2005, 14 s.
- [4] ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 24 s.

Webové a elektronické zdroje

- [5] Factory automation. *Přesnost CNC stroje? Dnes dokáže pracovat i na nanometry*. [online]. [cit. 7.4.2016]. Dostupné z: <http://factoryautomation.cz/presnost-cnc-stroje-dnes-dokaze-pracovat-i-na-nanometry/>
- [6] MM Průmyslové spektrum. *Komplexní údržba CNC obráběcích strojů* [online]. [cit. 8.4.2016]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/komplexni-udrzba-cnc-obrabecich-stroju.html>
- [7] Renishaw. *Klíčový hardware systému XL-80* [online]. [cit. 20.4.2016]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/klicovy-hardware-systemu-xl-80--8268>
- [8] Renishaw. *Teleskopické systémy ballbar* [online]. [cit. 25.4.2016]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/teleskopicke-systemy-ballbar--6813>
- [9] Renishaw. *Software Ballbar 20 pro systémy QC20-W a QC10* [online]. [cit. 25.4.2016]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/software-ballbar-20-pro-systemy-qc20-w-a-qc10--11076>
- [10] Renishaw. *Systém QC20-W ballbar* [online]. [cit. 25.4.2016]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/system-qc20-w-ballbar--11075>
- [11] TOS Varnsdorf. *Produkty* [online]. [cit. 25.4.2016]. Dostupné z: <http://www.tosvarnsdorf.cz/cz/produkty/prislusenstvi/upinaci-zarizeni/uu-800-uu-6000/>

- [12] TOS Varnsdorf. *UU 950* [online]. [cit. 25.4.2016]. Dostupné z:
<http://www.tosvarnsdorf.cz/files/machines/uu-950.pdf>
- [13] Homel VŠB. *Nejistota měření – postup stanovení* [online]. [cit. 26.4.2016].
Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=nejistota_p
ostup
- [14] Renishaw plc. *Renishaw Ballbar 20* [počítačový software, CD-ROM].
Verze 5.09.08.01.

7 Seznam příloh

Příloha A	Protokol měření XY 360° 100mm H1, Ballbar diagnostika (%)
Příloha B	Protokol měření XY 360° 100mm H1, Ballbar diagnostika (μm)
Příloha C	Protokol měření XY 360° 100mm H1, Ballbar diagnostická tabulka
Příloha D	Protokol měření XY 360° 100mm H1 dle ISO 230-4: 2005, Odchylka kruhovitosti G proti směru pohybu hodinových ručiček
Příloha E	Protokol měření XY 360° 100mm H1 dle ISO 230-4: 2005, Odchylka kruhovitosti G ve směru pohybu hodinových ručiček
Příloha F	Protokol měření XY 360° 100mm H1 dle ISO 230-4: 2005, Obousměrná odchylka kruhovitosti G(b)

Ballbar diagnostika (%)

XY 360stup 100mm H1

Obsluha: Statnice

Datum: 2016-1-20 08:09:22

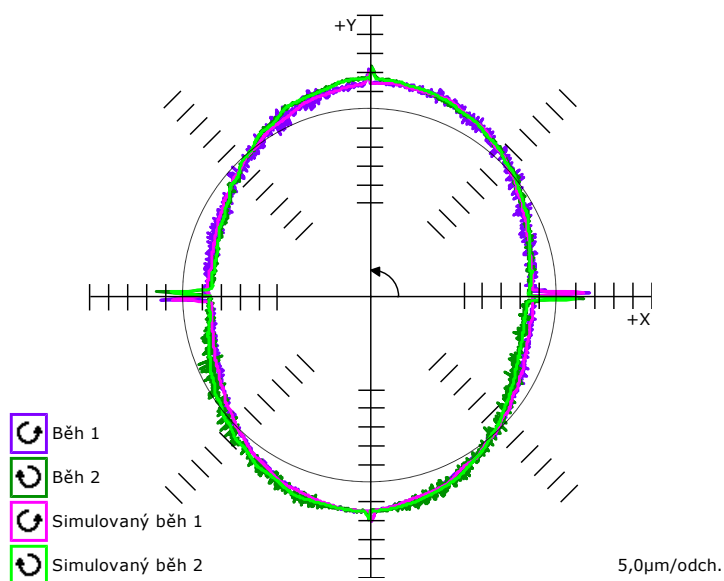
RENISHAW

Stroj: VOP

QC20-W: 453F06, Datum poslední kalibrace: 2014-08-19

37%	Relativní chyba odměřování
	-29,1μm
36%	Zpoždění serva X
	► 13,9μm
	◄ 11,8μm
8%	Zpoždění serva Y
	▲ 3,3μm
	▼ 2,4μm
6%	Kolmost
	-23,1μm/m
4%	Příčná vůle X
	► 1,5μm
	◄ 1,8μm

Kruhovitost 21,6μm



Ballbar diagnostika (μm)**RENISHAW****XY 360stup 100mm H1**

Obsluha: Statnice

Stroj: VOP

Datum: 2016-1-20 08:09:22

QC20-W: 453F06, Datum poslední kalibrace: 2014-08-19

Mrtvý chod (μm)

X ▶ 0,1 ◀ 0,3

Y ▲ 0,0 ▼ 0,5

Zpoždění serva (μm)

X ▶ 13,9 ◀ 11,8

Y ▲ 3,3 ▼ 2,4

Příčná vůle (μm)

X ▶ 1,5 ◀ 1,8

Y ▲ 1,1 ▼ -1,1

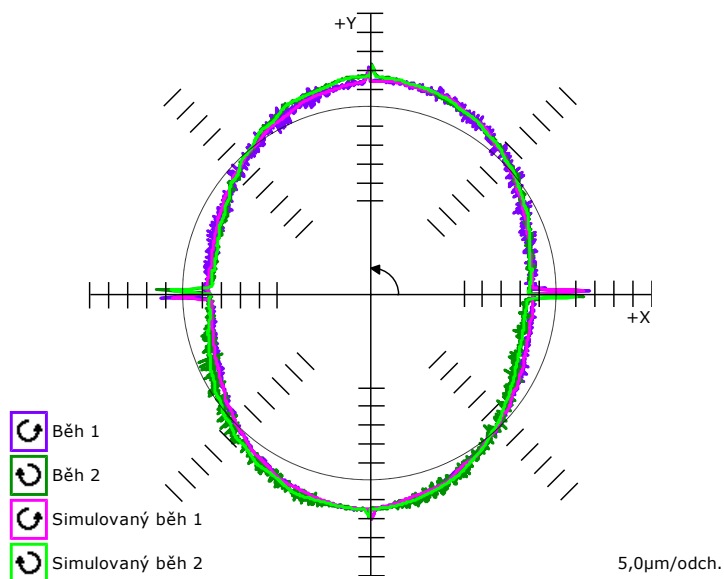
Amplituda cyklické chyby (μm)

X ↑ 0,4 ↓ 0,1

Y ↑ 0,8 ↓ 0,5

Další údaje

Neshoda serva -0,03ms

Kolmost -23,1 $\mu\text{m}/\text{m}$ Přímochařost X 0,4 μm Přímochařost Y 0,0 μm Relativní chyba odměřování -29,1 μm Kruhovitost 21,6 μm 

Ballbar diagnostická tabulka**XY 360stup 100mm H1**

Obsluha: Statnice

Stroj: VOP

Datum: 2016-1-20 08:09:22

QC20-W: 453F06, Datum poslední kalibrace: 2014-08-19

Chyba	Hodnota		Nezávislá kruhovitosť		Význam chyby
Mrtvý chod X	► 0,1	◄ 0,3µm	0,3µm	(1%)	(11)
Mrtvý chod Y	▲ 0,0	▼ 0,5µm	0,5µm	(1%)	(8)
Zpoždění serva X	► 13,9	◄ 11,8µm	13,9µm	(36%)	(2)
Zpoždění serva Y	▲ 3,3	▼ 2,4µm	3,3µm	(8%)	(3)
Příčná vůle X	► 1,5	◄ 1,8µm	1,7µm	(4%)	(5)
Příčná vůle Y	▲ 1,1	▼ -1,1µm	0,6µm	(1%)	(7)
Amplituda cyklické chyby X	↑ 0,4	↓ 0,1µm	0,4µm	(1%)	(10)
Amplituda cyklické chyby Y	↑ 0,8	↓ 0,5µm	0,8µm	(2%)	(6)
Neshoda serva	-0,03ms		0,5µm	(1%)	(9)
Kolmost	-23,1µm/m		2,3µm	(6%)	(4)
Přímochařost X	0,4µm		0,2µm	(0%)	(12)
Přímochařost Y	0,0µm		0,0µm	(0%)	(13)
Relativní chyba odměřování	-29,1µm		14,5µm	(37%)	(1)
Délka vlny cyklické chyby X	12,5000mm				
Délka vlny cyklické chyby Y	10,0000mm				
Vypočtený posuv	998,7mm/min				
Chyba středění X	-0,5µm				
Chyba středění Y	1,8µm				
Kruhovitost	21,6µm				

Parametry testu

Poloměr	100,0000mm
Posuv	1000,0mm/min
Začátek/Konec/Úhel přejezdu	180°/180°/180°
Běh	CCW CW
Souřadnice středu	
Vzorkovací frekvence	40,000Hz

ISO 230-4:2005(E)

RENISHAW

**Kruhovitost
XY 360stup 100mm H1**

Obsluha: Statnice

Datum: 2016-1-20 08:09:22

Stroj: VOP

QC20-W: 453F06, Datum poslední kalibrace: 2014-08-19

Kruhovitost (CCW)

Hodnota 19,0 μ m

Parametry testu

Poloměr 100,0000mm

Vzorkovací frekvence 40,000Hz

Posuv 1000,0mm/min

Směr snímání CCW

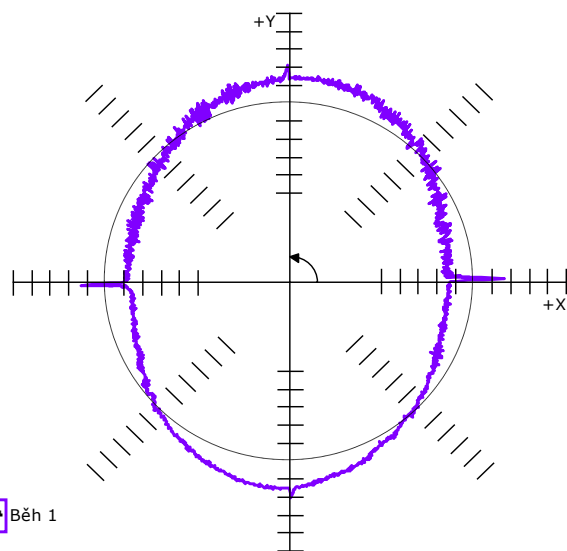
Rovina testu XY

Souřadnice středu

Start 180°

Konec 180°

Přejezd 180°



ISO 230-4:2005(E)

RENISHAW 

**Kruhovitost
XY 360stup 100mm H1**

Obsluha: Statnice

Datum: 2016-1-20 08:09:22

Stroj: VOP

QC20-W: 453F06, Datum poslední kalibrace: 2014-08-19

Kruhovitost (CW)

Hodnota 21,3µm

Parametry testu

Poloměr 100,0000mm

Vzorkovací frekvence 40,000Hz

Posuv 1000,0mm/min

Směr snímání CW

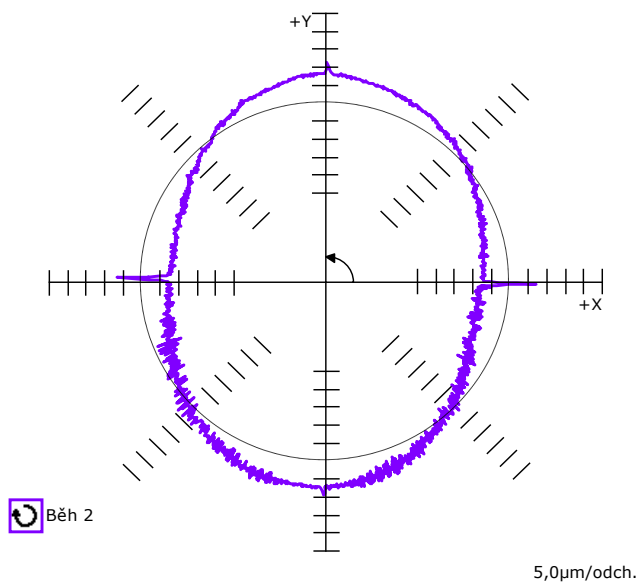
Rovina testu XY

Souřadnice středu

Start 180°

Konec 180°

Přejezd 180°



ISO 230-4:2005(E)

RENISHAW

**Obousměrná odchylna kruhovitosti
XY 360stup 100mm H1**

Obsluha: Statnice

Datum: 2016-1-20 08:09:22

Stroj: VOP

QC20-W: 453F06, Datum poslední kalibrace: 2014-08-19

Obousměrná odchylna kruhovitosti

Hodnota 21,6 μ m

Parametry testu

Poloměr 100,0000mm

Posuv 1000,0mm/min

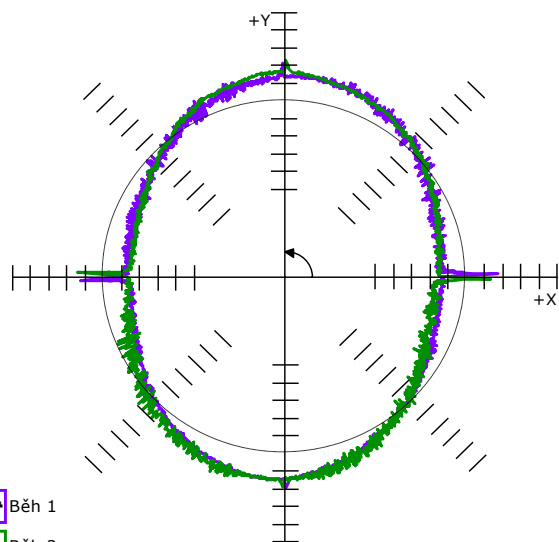
Běh CCW CW

Rovina testu XY

Souřadnice středu

Start 180°

Konec 180°



Další poděkování

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2016/172 Vliv technologických parametrů na obrobený povrch a SP2016/174 Studium procesu obrábění progresivních materiálů s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.